

CONTROLO DIFUSO PARA SUSPENSÕES AUTOMÓVEIS

Vasco Manuel Baptista Barbosa do Couto Dias



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2015

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Candidato: Vasco Manuel Baptista Barbosa do Couto Dias, Nº 1090495,
1090495@isep.ipp.pt

Orientação científica: Isabel Maria de Sousa de Jesus, isj@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

28 de julho de 2015

Agradecimentos

Durante o percurso de construção desta tese de Mestrado houve momentos de dificuldade e de alegria que foram partilhados com diversas pessoas, sendo que as ocasiões mais difíceis só foram possíveis de superar graças a elas. Desta forma gostaria de utilizar esta secção para agradecer a algumas dessas pessoas.

- Gostaria de agradecer à Eng^a Isabel Jesus pelo excelente apoio como orientadora, pelos conhecimentos que me transmitiu e que permitiram desenvolver um estudo estruturado e com bases teóricas sólidas.
- À minha namorada por me ter apoiado em todos os momentos difíceis onde o trabalho esteve mais parado e por partilhar os momentos de felicidade onde as várias metas eram alcançadas.
- Aos meus colegas que me acompanham desde a licenciatura e que apesar de se encontrarem ocupados com os seus respetivos trabalhos sempre me motivaram.
- E por fim à minha família pelo apoio que me deram em todo o meu percurso académico.

Resumo

Desde o aparecimento do primeiro automóvel produzido em massa que o objetivo de muitos engenheiros foi o de melhorar sua qualidade, desempenho, conforto entre outros aspetos, de forma a que os futuros automóveis fossem cada vez melhores.

O automóvel é constituído por diversos elementos os quais lhe acrescentam diversas características importantes. Um dos elementos que confere ao automóvel uma maior segurança, característica muito importante, é a suspensão existente no mesmo. As suspensões podem ser construídas de diversas formas, visando reagirem de modo diferente às diversas situações a que o automóvel é sujeito.

Como em qualquer tipo de tecnologia, as suspensões utilizadas atualmente nos automóveis em dia nem sempre foram tão evoluídas. As primeiras suspensões automóveis, eram constituídas por sistemas de molas mais rudimentares e onde as suas características eram fixas. Com o passar do tempo e com as constantes evoluções tecnológicas, estas suspensões passaram a ser constituídas por mais elementos, como os amortecedores, sendo que nos dias de hoje existem elementos que podem ser controlados em tempo real, de forma a melhor se adaptarem às condições das estradas. Estes elementos quando aplicados a suspensão automóvel constituem as suspensões ativas e semi-ativas existentes atualmente.

As suspensões ativas presentes nos veículos é o tema principal desta tese. O estudo efetuado pretende estudar se é possível criar um sistema de suspensão controlado por meio de um controlador difuso, o qual apresente um comportamento e desempenho característico das suspensões ativas abordadas ao longo do estudo teórico.

Para testar todo o trabalho, foram desenvolvidos modelos utilizando a ferramenta *Simulink* existente no *software* Matlab, com base em estudos matemáticos que permitem descrever o funcionamento das suspensões através de equações de movimento. Os controladores difusos desenvolvidos, os quais são implementados em todos os modelos são programados através do uso da *toolbox* para sistemas difusos existente no Matlab.

De forma a poder validar se, de facto, os modelos desenvolvidos eram fiáveis de serem implementados em futuras aplicações reais, foram comparados os resultados obtidos pelas suspensões ativas desenvolvidas com as suspensões passivas equivalentes.

Palavras-Chave

Suspensão automóvel, Conforto, Segurança, Suspensão ativa, Matlab, Lógica difusa, Controladores difusos, Sistemas controlados.

Abstract

Since the appearance of the first mass produced automobile that the goal of many engineers was to improve its quality, performance, comfort, among other things, so that future cars were getting better.

The automobile consists of several elements that add several important features. One of the elements that gives the car greater security, a very important feature, is the automobile suspension. Suspensions can be constructed in various ways, in order to react differently to the diverse situations that the automobile is subjected.

As with any type of technology, the suspensions used in today's cars days were not always so evolved. The first suspension systems consisted of rudimentary systems of springs and where their characteristics were fixed. Over time and with the constant technological developments, these suspensions came to consist of more elements such as shock absorbers, and in today's days with elements that can be controlled in real time in order to better adapt road conditions. These elements when applied to automobile suspension make the active and semi-active suspensions that exist currently developed vehicles.

Existing automotive active suspensions is the main theme of this thesis. The studies that was meant to study if it is possible to create a controlled suspensions system controlled by a fuzzy logic controller, which can present the characteristic behavior and performance of the active suspensions addressed throughout the theoretical study.

In order to test the entire study, different models were developed using the Simulink tool present in the Matlab software. This models were based of mathematical studies that allow us to describe the behaviour of different suspensions through their equations of motion. The different fuzzy controllers that were developed were programmed using the fuzzy systems toolbox within the Matlab software.

In order to be able to validate that indeed reliable models were developed to be implemented on future real applications, the results obtained from the active suspensions were compared to the results obtained from an equivalent passive suspension system.

Keywords

Automotive suspension, Comfort, Safety, Active suspension, Matlab, Fuzzy logic, Fuzzy controllers, Controlled systems

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
ACRÓNIMOS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 CALENDARIZAÇÃO	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2. SUSPENSÕES	5
2.1 BREVE HISTÓRIA	5
2.2 CONSTITUIÇÃO	6
2.2.1 Molas	7
2.2.1.1 Molas lâmina (<i>Leaf Spring</i>)	7
2.2.1.2 Barra de torção (<i>Torsion Bar/Twist Beam</i>)	8
2.2.1.3 Molas bobinadas (<i>Coil Springs</i>)	9
2.2.2 Amortecedores	10
2.2.2.1 Duplo-tubo (<i>Twin-Tube</i>)	11
2.2.2.2 Mono-tubo	12
2.3 SUSPENSÕES PASSIVAS	13
2.3.1 Escora MacPherson (<i>MacPherson Strut</i>)	13
2.3.2 Suspensão com duplo <i>wishbone</i>	14
2.3.3 Suspensão de múltiplos elos (<i>Multi-link Suspension</i>)	15
2.3.4 Suspensão com molas bobinadas e eixo fixo (<i>Solid-axle, coil-spring suspension</i>)	16
2.4 SUSPENSÕES ATIVAS E SEMI-ATIVAS/ADAPTATIVAS	16
2.4.1 Suspensões semi-ativas	17
2.4.1.1 Casos de estudo de suspensões semi-ativas	18
2.4.2 Suspensões totalmente ativas	19
2.4.2.1 Casos de estudo de suspensões totalmente ativas	20

3.	CONTROLADORES DIFUSOS	25
3.1	BREVE HISTÓRIA	26
3.2	LÓGICA DIFUSA	26
3.2.1	Conjuntos difusos <i>versus</i> Conjuntos clássicos	27
3.2.2	Sistemas difusos	31
3.2.2.1	Funções de pertença	31
3.2.2.2	Termos linguísticos	33
3.2.2.3	Termos conectivos e regras	33
3.2.3	<i>Toolbox</i> de sistemas difusos do <i>Matlab</i>	34
3.3.	CONTROLADOR DIFUSO	39
3.3.1	Fusificador	40
3.3.2	Base de conhecimento	40
3.3.3	Mecanismo de inferência	41
3.3.3.1	Sistema de inferência Mamdani.....	41
3.3.3.2	Sistema de inferência Sugeno.....	42
3.3.4	Desfusificador	42
3.4.	CASOS DE ESTUDO E FUTURAS EVOLUÇÕES	42
3.4.1	Máquina de lavar roupa [Alhanjouri]	42
3.4.2	Semáforo de trânsito [Antunović]	43
4.	MODELAÇÃO DO SISTEMA	45
4.1.	TERMOS IMPORTANTES.....	45
4.2.	MODELOS DO SISTEMA DE SUSPENSÃO	47
4.2.1	Suspensões Semi-ativas.....	47
4.2.2	Suspensões totalmente ativas	52
5.	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA.....	61
5.1.	MODELOS DESENVOLVIDOS.....	62
5.1.1	Suspensões passivas	62
5.1.2	Suspensões semi-ativas	63
5.1.2.1	Quarto de carro.....	63
5.1.2.2	Meio carro	69
5.1.2.3	Carro completo	74
5.1.3	Suspensões totalmente ativas	80
5.1.3.1	Quarto de carro.....	80
5.1.3.2	Meio carro	85
5.1.3.3	Carro completo	90
6.	TESTES E RESULTADOS	99
6.1.	QUARTO DE CARRO	99
6.2.	MEIO CARRO	101
6.3.	CARRO COMPLETO.....	106
6.4.	TESTES ADICIONAIS.....	115
6.4.1	Suspensão ativa para um quarto de autocarro	115

6.4.2	Suspensão ativa para um novo veículo completo	116
6.4.3	Novo perfil de estrada.....	121
6.4.3.1	Suspensão semi-ativa	122
6.4.3.2	Suspensão totalmente ativa	124
6.5.	CONCLUSÕES PRELIMINARES	127
7.	CONCLUSÕES.....	129
7.1.	PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	130
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	131

Índice de Figuras

Figura 1 - Unidade suspensão do Peugeot 206 [freewtc]	7
Figura 2 - Mola lâmina (<i>Leaf Spring</i>) [ultimatesuspension]	8
Figura 3 - Barra de torção H [kfz-tech]	8
Figura 4 - Molas bobinadas (<i>Coil Springs</i>) [howstuffworks]	9
Figura 5 - Amortecedor [tradeindia]	10
Figura 6 - Ciclo de Extensão/Ciclo de Compressão	11
Figura 7 - Amortecedor Mono-tubo	13
Figura 8 - <i>Macpherson Strut</i> [johnnysmultimedia]	14
Figura 9 - <i>Double wishbone</i> [double wishbone]	15
Figura 10 - Suspensão de múltiplos elos (<i>Multi-link suspension</i>) [vwvortex]	15
Figura 11 - <i>Solid-axle, coil-spring suspension</i> [johnnysmultimedia]	16
Figura 12 - Amortecedor com válvula semi-ativa	17
Figura 13 - Amortecedor de fluido magnético	18
Figura 14 - Audi TT 2ª Geração [performancecarstats]	18
Figura 15 - Representação básica de uma suspensão ativa	19
Figura 16 - Suspensão Bose [extremetech]	21
Figura 17 - Veículo a curvar: a) Sem suspensão Bose; b) Com suspensão Bose [bose]	22
Figura 18 - Passagem por uma lomba: a) Sem suspensão Bose; b) Com suspensão Bose [bose] ...	22
Figura 19 - Reconhecimento de estradas (<i>Magic Body Control</i>) [bimmerfest]	23
Figura 20 – Precisão e significância [FLTool]	27
Figura 21 – Problema da gorjeta [FLTool]	28
Figura 22 – Solução linear [FLTool]	28
Figura 23 – Solução linear (intervalos fixos) [FLTool]	29
Figura 24 – Solução utilizando lógica difusa [FLTool]	30
Figura 25 – Representação dos conjuntos clássicos e difusos [Platen, Kampichler]	31
Figura 26 – Funções de pertença [FLTool]	32
Figura 27 – Variáveis linguísticas [Sisca]	33
Figura 28 – Interface de criação de lógica difusa	35
Figura 29 – Exemplo de sistema difuso simples	36
Figura 30 – Exemplo de funções de pertença	36
Figura 31 - Exemplo de funções de regras difusas	37
Figura 32 – Exemplo de superfície de resultados	38
Figura 33 – Visualizador de regras	39
Figura 34 – Sistema de controlo difuso	40

Figura 35 – Superfície de respostas [Alhanjouri]	43
Figura 36 – Intersecção do tipo T [Antunović]	44
Figura 37 - <i>Roll</i> [maesusp]	46
Figura 38 - <i>Pitch</i> [maesusp]	47
Figura 39 - Suspensão semi-ativa (<i>Quarter-car</i>) [Rashid]	48
Figura 40 - Suspensão semi-ativa (<i>Half-car</i>)	49
Figura 41 - Suspensão semi-ativa (<i>Full-car</i>) [Hamed]	51
Figura 42 - Suspensão totalmente ativa (<i>Quarter-car</i>) [Rashid]	53
Figura 43 - Suspensão totalmente ativa (<i>Half-car</i>) [Vaughan]	54
Figura 44 - Suspensão totalmente ativa (<i>Full-car</i>) [Darus]	57
Figura 45 – Modelo de suspensão passiva para um quarto de carro	62
Figura 46 – Modelo de suspensão passiva para meio carro	62
Figura 47 - Modelo de suspensão passiva para um carro completo	63
Figura 48 – Modelo de suspensão semi-ativa para um quarto de carro	64
Figura 49 - Perfil da estrada	65
Figura 50 – Controlador difuso semi-ativo para um quarto de carro	66
Figura 51 – Variável de entrada - deslocamento para um quarto de carro	67
Figura 52 – Variável de entrada - velocidade para um quarto de carro	67
Figura 53 – Variável de saída - coeficiente de amortecimento para um quarto de carro	68
Figura 54 - Modelo de suspensão semi-ativa para meio carro	70
Figura 55 – Suspensão semi-ativa para meio carro	70
Figura 56 – Controlador difuso semi-ativo para meio carro	71
Figura 57 – Variável de entrada - deslocamento para a roda frontal de meio carro	72
Figura 58 – Variável de entrada - velocidade para a roda frontal de meio carro	73
Figura 59 – Variável de saída - coeficiente de amortecimento para a roda frontal de meio carro ...	73
Figura 60 – Modelo de suspensão semi-ativa para um carro completo	75
Figura 61 - Esquema do controlador difuso	76
Figura 62 – Suspensão semi-ativa para um carro completo	76
Figura 63 – Controlador difuso semi-ativo para um carro completo	77
Figura 64 – Variável de entrada - deslocamento para a roda frontal direita de um carro completo.	78
Figura 65 – Variável de entrada - velocidade para a roda frontal direita de um carro completo	79
Figura 66 – Variável de saída - coeficiente de amortecimento para a roda frontal direita de um carro completo	79
Figura 67 – Modelo de suspensão ativa para um quarto de carro	81
Figura 68 – Suspensão ativa para um quarto de carro	81
Figura 69 – Controlador difuso ativo para um quarto de carro	82
Figura 70 – Variável de entrada - deslocamento para um quarto de carro	83
Figura 71 – Variável de entrada - velocidade para um quarto de carro	83
Figura 72 - Variável de saída - força para um quarto de carro	84

Figura 73 - Modelo de suspensão ativa para meio carro	85
Figura 74 - Suspensão ativa para meio carro	86
Figura 75 – Controlador difuso normalizado para meio carro	86
Figura 76 - Controlador difuso ativo para meio carro.....	87
Figura 77 - Variável de entrada - deslocamento para a roda frontal de meio carro	88
Figura 78 - Variável de entrada - velocidade para a roda frontal de meio carro	88
Figura 79 - Variável de saída - força para a roda frontal de meio carro.....	89
Figura 80 – Modelo de suspensão ativa para um carro completo	91
Figura 81 - Suspensão ativa para um carro completo	92
Figura 82 – Controlador difuso normalizado para um carro completo	93
Figura 83 – Controlador difuso ativo para um carro completo	94
Figura 84 – Variável de entrada - deslocamento para a roda frontal direita de um carro completo.	95
Figura 85 – Variável de entrada - velocidade para a roda frontal direita de um carro completo	95
Figura 86 – Variável saída - força para a roda frontal direita de um carro completo.....	96
Figura 87 – Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa para um quarto de carro.....	100
Figura 88 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para um quarto de carro	101
Figura 89 – Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa para o lado frontal de um meio carro	102
Figura 90 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa para o lado traseiro de um meio carro	103
Figura 91 – Comparação do <i>pitch</i> para a suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa de um meio carro.....	103
Figura 92 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para o lado frontal de um meio carro	104
Figura 93 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para o lado traseiro de um meio carro.....	105
Figura 94 - Comparação do <i>pitch</i> para a suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa de um meio carro	106
Figura 95 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa para a roda frontal direita de um carro completo.....	107
Figura 96 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa para a roda frontal esquerda de um carro completo.....	108
Figura 97 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa para a roda traseira direita de um carro completo.....	108
Figura 98 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa para a roda traseira esquerda de um carro completo.....	109
Figura 99 - Comparação do <i>pitch</i> para a suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa de um carro completo.....	110
Figura 100 - Comparação do <i>roll</i> para a suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa de um carro completo.....	110
Figura 101 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para a roda frontal direita de um carro completo.....	111

Figura 102 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para a roda frontal esquerda de um carro completo.....	112
Figura 103 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para a roda traseira direita de um carro completo.....	112
Figura 104 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para a roda traseira esquerda de um carro completo.....	113
Figura 105 - Comparação do <i>pitch</i> para a suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa de um carro completo.....	114
Figura 106 - Comparação do <i>roll</i> para a suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa de um carro completo.....	114
Figura 107 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para um quarto de autocarro.....	116
Figura 108 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para a roda frontal direita de um carro completo.....	117
Figura 109 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para a roda frontal esquerda de um carro completo.....	118
Figura 110 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para a roda traseira direita de um carro completo.....	118
Figura 111 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para a roda traseira esquerda de um carro completo.....	119
Figura 112 - Comparação do <i>pitch</i> para suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa de um carro completo.....	120
Figura 113 - Comparação do <i>roll</i> para suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa de um carro completo.....	120
Figura 114 – Novo perfil de estrada.....	121
Figura 115 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa para a o lado frontal de um meio carro	122
Figura 116 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa para a o lado traseiro de um meio carro	123
Figura 117 - Comparação do <i>pitch</i> para a suspensão passiva <i>versus</i> suspensão semi-ativa de meio carro.....	124
Figura 118 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para a o lado frontal de um meio carro ..	125
Figura 119 - Suspensão passiva <i>versus</i> suspensão ativa para a o lado traseiro de um meio carro .	125
Figura 120 - Comparação do <i>pitch</i> para a suspensão passiva <i>versus</i> suspensão totalmente ativa de meio carro (novo perfil de estrada)	126

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Calendarização	3
Tabela 2 - Variáveis para o modelo de meio carro com suspensão semi-ativa	50
Tabela 3 - Variáveis para o modelo de carro completo com suspensão semi-ativa	52
Tabela 4 - Variáveis para o modelo de meio carro com suspensão totalmente ativa	56
Tabela 5 - Variáveis para o modelo de carro completo com suspensão totalmente ativa	59
Tabela 6 – Matriz de regras difusas para um quarto de carro	69
Tabela 7 – Matriz de regras difusas para meio carro	74
Tabela 8 – Matriz de regras difusas para um carro completo.....	80
Tabela 9 – Matriz de regras difusas ativas para um quarto de carro	84
Tabela 10 – Matriz de regras difusas ativo para a roda frontal de meio carro	90
Tabela 11 – Matriz de regras difusas ativo para a roda direita frontal de um carro completo	97
Tabela 12 – Dados do veículo para um quarto de carro [Rashid]	100
Tabela 13 - Dados do veículo para meio carro [STŘÍBRSKÝ]	102
Tabela 14 - Dados do veículo para um carro completa [Ping, Hseng]	107
Tabela 15 - Dados do veículo para um quarto de autocarro [Bus_parameters]	115
Tabela 16 - Dados do veículo para um carro completo [Mitra]	117

Acrónimos

ECU – Engine Control Unit

ABC – Active Body Control

MBC – Magic Body Control

MR – Magnetorheological fluid

1. INTRODUÇÃO

Desde o aparecimento do primeiro automóvel que o instinto dos engenheiros sempre foi melhorar a sua qualidade, desempenho, conforto, bem como outros aspetos nos futuros veículos a serem desenvolvidos.

Um dos principais elementos dos automóveis, que confere segurança e conforto ao condutor durante o período da condução é a suspensão que o seu automóvel possui. As suspensões concedem ao automóvel um conjunto de fatores que permitem melhorar a manobrabilidade do veículo, nomeadamente a sua aderência à estrada (suspensões mais duras, moles, mais baixas, etc.), maior segurança dos ocupantes consoante o tipo de situação (curvas, travagens, altas velocidades, etc.) e também um maior conforto dos ocupantes uma vez que, com uma boa suspensão os ocupantes podem nem sentir as irregularidades da estrada entre outros aspetos.

As primeiras suspensões consistiam em simples mecanismos de lâmina, daí o seu nome de suspensão de lâminas (*leaf suspension*), que são simples mecanismos puramente mecânicos que amortecem, as interferências na condução dos veículos, recorrendo à flexão das lâminas. Depois foram desenvolvidas as suspensões de mola (*coil suspension*) que fazendo uso de molas permitem amortecer com maior eficácia as forças e as ações que as irregularidades do piso exercem no veículo. E avançando para os dias de hoje, e com o evoluir da eletrónica automóvel, surgiram as suspensões ativas e semi-ativas, algumas ainda recorrendo a molas mas muitas delas utilizando suspensões hidráulicas e suspensões a ar, que em conjunto com a eletrónica conseguem produzir resultados vantajosos, como por exemplo, a suspensão adapta-se de acordo com o tipo de piso, o movimento do carro, a velocidade, entre outros.

A lógica difusa em sistemas de controlo ao contrário dos controladores clássicos, como o controlador PID, faz uso de termos mais abstratos e gerais ao invés de cálculos analíticos e valores fixos. Isto faz com que os controladores difusos (ou *fuzzy*) sejam extremamente flexíveis e de mais simples alteração que os controladores clássicos, ou seja, permitem um melhor controlo do sistema em que forem aplicados. Para efetuar o controlo, os controladores difusos fazem uso de termos linguísticos simples como, quente, frio, rápido, entre outros que são definidos pelo projetista. Estes controladores possuem também uma base de regras definidas pelo projetista que utiliza os termos linguísticos definidos para criar as regras de controlo. Por exemplo, se num sistema de controlo de velocidade de um servomotor temos que o erro relativamente ao valor de referência é muito negativo e a variação do erro é muito negativa, o sistema de controlo tem que dar uma ação de controlo muito negativa. Este pode ser traduzido numa regra utilizando os termos lógicos, AND, THEN, OR.

1.1 Contextualização

Este tema surgiu do interesse de realizar um trabalho na área dos controladores difusos.

Sendo os controladores difusos uma tecnologia cada vez mais emergente e sendo estes passíveis de serem implementados em diversos cenários, achou-se interessante aplicar este método de controlo em automóveis, mais precisamente nas suas suspensões.

Tendo em conta a necessidade de se perceber o funcionamento dos diferentes tipos de suspensões existentes em automóveis e de que forma o controlo difuso pode ser implementado para o seu controlo, foi necessário realizar um estudo relativamente a ambos os assuntos.

1.2 Objetivos

O objetivo desta tese de mestrado é fazer um estudo dos diferentes tipo de suspensões e de controladores difusos e desenvolver um sistema de controlo difuso que consiga efetuar o controlo da suspensão de um automóvel de forma correta, de acordo com os diferentes parâmetros a que o automóvel se encontra sujeito.

Este sistema de controlo difuso irá ser desenvolvido com recurso à ferramenta MATLAB e posteriormente será alvo de testes e validações que irão verificar se de facto o sistema cumpre os requisitos estipulados.

1.3 Calendarização

De forma a tornar clara todos os passos necessários para a elaboração do relatório e de forma a estimar qual o tempo necessário para cada etapa do trabalho é apresentada na Tabela 1, a calendarização planeada para a realização do trabalho proposto e escrita do relatório.

Tabela 1 - Calendarização

Cronograma	Semana																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Estudo da organização do relatório																					
Pesquisa sobre suspensões																					
Pesquisa sobre controladores difusos																					
Estudo dos modelos de suspensões ativas																					
Desenvolvimento do controlador difuso																					
Testes e validações																					
Escrita do relatório																					
Apresentação																					

1.4 Organização do relatório

No Capítulo 1 é feita uma pequena introdução ao tema proposto para a tese de mestrado, assim como os seus objetivos, calendarização e organização do relatório.

No capítulo seguinte, 2, é apresentada a pesquisa referente ao tema das suspensões automóveis, onde de forma breve se ilustra a evolução das suspensões automóveis e em que situação se encontra atualmente a tecnologia utilizada nas mesmas.

No Capítulo 3 é apresentado o estado da arte relativo ao tema dos controladores difusos, referindo as suas vantagens e desvantagens, a sua evolução, entre outros aspetos relevantes dos mesmos.

No Capítulo 4 é feito o estudo preliminar do sistema a implementar, apresentando todas as metodologias a utilizar, de que forma irão ser modelados os diferentes processos referentes ao sistema e mostrar como deverá ser desenvolvido o controlador.

No Capítulo 5 é mostrado como foi implementado todo o sistema desenvolvido referindo todos os seus aspetos mais importantes de cada um desses sistemas.

No Capítulo 6 são apresentados todos os testes executados aos sistemas desenvolvidos no capítulo anterior, 5, de forma a poder validar todos os modelos desenvolvidos.

Para finalizar, no Capítulo 7, é resumido todo o trabalho desenvolvido, apresentando-se as respetivas conclusões, dificuldades e limitações encontradas á medida que se foi progredindo, assim como possíveis desenvolvimentos futuros dentro do mesmo tema.

2. SUSPENSÕES

As suspensões são um componente essencial na constituição de um automóvel, uma vez que sem ela o conforto e a segurança dos ocupantes do veículo estariam em risco. O sistema de suspensão é o responsável por fazer a ligação entre o solo e a carroçaria do veículo, de forma a garantir que o mesmo se desloca de forma regular, diminuindo assim o impacto das irregularidades do solo.

Este Capítulo pretende apresentar uma breve história sobre o desenvolvimento das suspensões no ramo automóvel, assim como o seu funcionamento e constituição, e também o estado atual de desenvolvimento dos sistemas de suspensão.

2.1 Breve história

Desde muito cedo na história da humanidade, no tempo em que o principal meio de deslocamento eram as carruagens movidas através do recurso a animais (por exemplo. cavalos, bois, burros, entre outros), que já se verificava a utilização de sistemas de suspensão. Estes sistemas mais primitivos faziam uso de molas de laminas (*leaf spring*) também elas primitivas e com materiais da época (não só metal como também madeira), que permitiam às carruagens ter um bocado mais de flexibilidade de amortecer as irregularidades dos pisos. Como curiosidade, o desenvolvimento das primeiras molas de lâminas surgiu como forma

de catapultas, os antigos utilizavam as potencialidades flexíveis e elásticas das molas para lançar projeteis contra as fortalezas.

Com o aparecimento de melhores conhecimentos na área da metalúrgica e com o surgir da industrialização, Obadiah Elliott registou a primeira patente para um veículo que possuiu-se uma suspensão de molas. Este sistema consistia na ligação direta de uma mola de lâmina de cada lado da carruagem, que por sua vez estava ligada aos eixos da carruagem. Este sistema acabou por ser utilizado durante vários anos e em varias carruagens Britânicas. Com o aparecimento das primeiras estradas modernas estas suspensões tornaram-se pouco adequadas e foi necessário introduzir outros tipos de sistemas.

O aparecimento automóvel implicou que o sistema de suspensão desenvolvido para as carruagens de cavalos, as quais se deslocavam a baixas velocidades, fossem inadequadas para os automóveis. Surgiram então sistemas de suspensão com molas (em forma de bobine, denominadas *coil springs*) e mais tarde a introdução dos amortecedores (*dampers*) que conferiram ao automóvel um melhor desempenho a nível da manobralidade, condução, e também de segurança e conforto.

A evolução esperada das diferentes tecnologias permitiu, nos casos de gamas altas de automóveis, desenvolver e implementar suspensões que recorrem a suspensões a ar e hidráulicas, assim como desenvolver suspensões ativas que se conseguem adaptar às diferentes condições em que o automóvel se encontra, proporcionando assim melhores condições para os ocupantes do veículo [motorera].

2.2 Constituição

A constituição das suspensões automóveis tem como principais elementos as molas e os amortecedores, como foi referido anteriormente, no início os sistemas só eram compostos pelas molas e mais tarde foram introduzidos os amortecedores para maximizar o desempenho do sistema. A Figura 1 apresenta um exemplo de uma unidade de suspensão moderna, e a mais comum nos automóveis de hoje em dia [howstuffworks_2], [johnnysmultimedia].



Figura 1 - Unidade suspensão do Peugeot 206 [freewtc]

2.2.1 Molas

A principal função das molas é a de absorver a energia que é gerada quando as rodas encontram uma deformidade no solo, e converte-la em energia potencial na mola. Desta forma o automóvel é resguardado de grandes variações de vibração a que ele possa ser sujeito, e assim evita danos na estrutura do automóvel e o desconforto dos ocupantes.

Como qualquer tipo de tecnologia, as molas utilizadas nas suspensões nem sempre foram as utilizadas nos dias de hoje, sendo assim, alguns dos principais tipos de molas são descritos de seguida [carbibles].

2.2.1.1 Molas lâmina (*Leaf Spring*)

Os sistemas de suspensão com molas lâmina são considerados como sendo os primitivos, uma vez que começaram por ser utilizados em carroças de cavalos. A utilização deste tipo de molas foi bastante comum desde 1970 na Europa e no Japão, e no final dos anos 70 na América. Hoje em dia, ainda é possível encontrar este tipo de molas em camiões e em veículos de carga.

As molas lâmina são constituídas por várias placas ou lâminas, sobrepostas e com um ligeiro arco como é apresentado pela Figura 2. Esta composição, juntamente com o arco conferem a este sistema as características básicas para absorver as vibrações e as deformações do solo. A forma como são dispostas as lâminas, a quantidade de lâminas e a forma como as molas são instaladas são também fatores que podem determinar o melhor funcionamento da suspensão. [leaf spring], [howstuffworks].



Figura 2 - Mola lâmina (*Leaf Spring*) [ultimatesuspension]

2.2.1.2 Barra de torção (*Torsion Bar/Twist Beam*)

Normalmente acompanhada por mais elementos para compor uma suspensão completa, as barras de torção são grandes peças solidas em forma de H ou C, que são ligadas ao chassis do automóvel. A Figura 3 mostra uma barra de torção do tipo H.



Figura 3 - Barra de torção H [kfz-tech]

Este tipo de sistema é considerado um sistema resistivo. Uma vez que um dos pontos de fixação das barras de torção é um local fixo (ou imóvel) e o outro as rodas, sempre que as rodas encontram uma deformidade esta mesma vai aplicar força nas rodas que por sua vez irão aplicar força na barra de torção. A barra de torção vai começar a torcer devido as forças aplicadas, mas como é um sistema resistivo, a barra vai sempre retornar o mais rapidamente possível à sua posição inicial.

Desta forma, a barra de torção consegue conferir aos veículos, características elásticas que permitem a absorção das deformidades da estrada [ehow], [torsion], [howstuffworks].

2.2.1.3 Molas bobinadas (*Coil Springs*)

Hoje em dia o tipo de molas mais comuns utilizadas nos mais diversos tipos de veículos, são as molas bobinadas que como o nome indica são molas que são constituídas por metal enrolado em forma de bobine como é possível de verificar na Figura 4.



Figura 4 - Molas bobinadas (*Coil Springs*) [howstuffworks]

Como qualquer outro tipo de mola, o seu funcionamento passa por absorver a força que as deformidades da estrada exercem no automóvel, transformando-as em energia elástica que depois é dissipada.

No entanto, este tipo de molas apresenta algumas vantagens face aos outros tipos o que faz com que elas sejam o tipo de mola mais utilizado nos automóveis mais modernos. Essas vantagens são [iqsdirectory]:

- **Peso reduzido:** O facto de as molas serem fabricadas na forma de bobine faz com que estas sejam mais fortes para veículos de peso superior o que evita a utilização de demasiado metal para as suspensões.
- **Preço reduzido:** A quantidade de material que é necessária para fabricar uma mola deste tipo é bastante menor em relação á quantidade necessária para outros tipos. A maior parte das molas são fabricadas com metais de menor custo o que também contribui para o menor custo total da mola.

- **Manutenção reduzida:** Muitas das molas são bastante resistentes e não necessitam de manutenção minuciosa. Um dos problemas que pode ocorrer é a quebra das mesmas mas o seu custo é reduzido.
- **Versatilidade:** Existe uma variedade de molas bobinadas que podem ser usadas para diferentes tipos de veículos. Podem ser fabricadas molas com maior tensão, compressão entre outros.

2.2.2 Amortecedores

Se só existissem as molas, os automóveis depois de encontrar uma deformidade da estrada iriam balouçar indefinidamente até toda a energia aplicada nas molas ser dissipada. Se a força fosse muito elevada, o tempo que demoraria toda a energia a ser dissipada poderia ser tão longo que o automóvel simplesmente sucumbisse antes de toda a energia ser dissipada. Para evitar este problema apareceram os amortecedores (*Dampers/Shock absorbers*). A Figura 5 apresenta um amortecedor comum presente nos automóveis [johnnysmultimedia].



Figura 5 - Amortecedor [tradeindia]

Os amortecedores são normalmente compostos por uma espécie de pistão dentro de um cilindro. Este pistão possui pequenos orifícios que servem de passagem para o óleo existente dentro do amortecedor. Quando o veículo encontra uma deformidade da estrada a mola entra num estado de compressão e descompressão rápida, tendo o amortecedor que acompanhar este movimento, comprimindo e descomprimindo, mas como o "pistão" apresenta os referidos pequenos orifícios o óleo dentro do amortecedor passa em poucas quantidades elevando a pressão, o que faz com que o amortecedor abrande o movimento da mola, dissipando assim mais rapidamente a energia. Estes fenómenos de compressão e

descompressão são denominados ciclos de compressão e ciclo de extensão, como mostra a Figura 6.

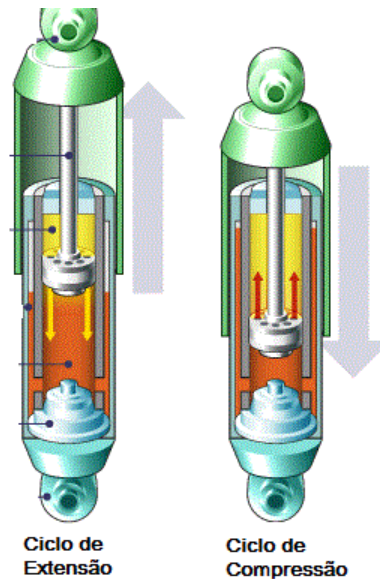


Figura 6 - Ciclo de Extensão/Ciclo de Compressão

Como descrito anteriormente, durante o ciclo de compressão o pistão é empurrado para baixo comprimindo o óleo existente no nível abaixo, fazendo com que este passe pelos orifícios existentes nestes mesmos. No ciclo de extensão, o pistão ao subir comprime todo o óleo existente acima dele e através dos mesmos orifícios, a pressão com que o óleo passa por eles abrandando o movimento da mola. Apesar de os dois ciclos serem em tudo semelhantes, eles controlam dois tipos de movimentos da mola distintos [howstuffworks].

À semelhança das molas, existem diferentes tipos de amortecedores que surgiram à medida que a tecnologia foi evoluindo. A principal taxonomia para dividir os tipos de amortecedores é dividi-los nos grupos:

- Duplo-tubo (*Twin-Tube*)
- Mono-tubo

2.2.2.1 Duplo-tubo (*Twin-Tube*)

Os amortecedores ditos duplo-tubo, como o nome indica, são constituídos por dois tubos cilíndricos, um dentro do outro, sendo o tubo interior chamado de *working tube* ou *pressure*

tube e o exterior de *reserve tube*. Dentro deles, existe também o pistão com orifícios que se move verticalmente dentro dos tubos dissipando a energia das irregularidades, e ainda uma válvula de compressão. A Figura 6 apresenta um exemplo de um amortecedor deste tipo.

Outros tipos de amortecedores de duplo-tubo acabam por ser variações do mesmo sistema, acrescentando componentes e tecnologias que melhoram o desempenho do amortecedor. Algumas destas variações são:

- **Célula de gás com dois tubos (*Gas cell two-tube*):** Com um *design* semelhante ao amortecedor com dois tubos clássico, mas onde é introduzido uma carga de nitrogénio gasoso de baixa pressão. A introdução do gás é feita para reduzir de forma drástica a espuma que é gerada das compressões e descompressões do líquido do amortecedor, conseguindo assim um melhor desempenho do componente.
- **Amortecimento sensível à posição (*Position sensitive damping*):** A fase seguinte da evolução da tecnologia de amortecedores, mantendo a estrutura de dois tubos e com a carga de nitrogénio gasoso, surgiu com o acrescentar de estrias ao tubo interior, o *working tube*. Estas estrias permitem ao pistão existente mover-se com maior liberdade para cargas mais leves (estradas como autoestradas ou estradas em boas condições) mas quando face a superfícies mais irregulares o pistão fica com menos liberdade o que faz com que o seu movimento fique mais intenso.
- **Amortecimento sensível à aceleração (*Acceleration sensitive damping*):** Enquanto os amortecedores sensíveis à posição só tem a capacidade de responder a situações abstratas como estradas lisas ou rugosas, este tipo de amortecedores passam a conseguir detetar cada uma das irregularidades da estrada. Isto foi conseguido através da mudança da válvula de compressão, a qual permitiu obter melhores níveis de desempenho e conforto.

2.2.2.2 Mono-tubo

Os amortecedores mono-tubo são os precedentes aos amortecedores de duplo-tubo referidos na seção anterior. Apresentados pela primeira vez em 1950, foram considerados um grande avanço revolucionário da época. Como o nome indica, este amortecedor é composto por um único tubo onde existem dois pistões, um pistão denominado *working piston* que é o pistão

que aplica diretamente a pressão no tubo, e um pistão livre chamado de *dividing* ou *floating piston*, que segura o gás existente do óleo, como mostra a Figura 7.

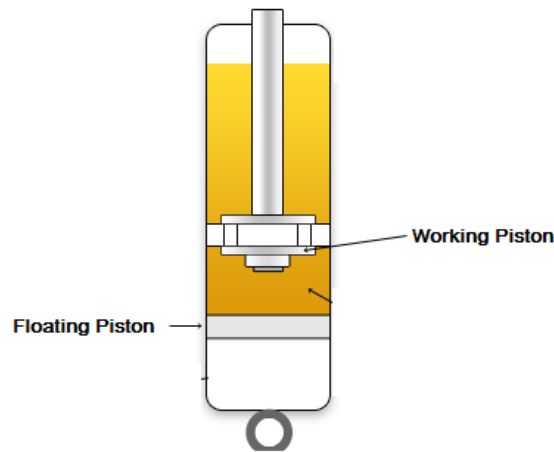


Figura 7 - Amortecedor Mono-tubo

Os dois pistões são completamente independentes mas movem-se de forma sincronizada, ou seja, sempre que o pistão fixo comprime, o pistão livre segue esse movimento comprimindo a sua parte. A existência da divisão onde existe o gás comprimido, serve para apoiar a pressão que é imposta pelo pistão, de forma a fazer também o ressaltado para dissipar a energia.

2.3 Suspensões passivas

As suspensões ditas de passivas são as que usam os componentes tradicionais referidos na secção 2.2 e onde não existe nenhum tipo de controlo eletrónico sobre as propriedades das suspensões. Ou seja, as suspensões são construídas utilizando componentes com diferentes propriedades as quais acabam por definir o comportamento da suspensão. Alguns exemplos deste tipo de suspensões são as referidas em [Griffin] e [johnnysmultimedia].

2.3.1 Escora MacPherson (*MacPherson Strut*)

Conhecida por ser o tipo de suspensão dianteira mais utilizada em automóveis de origem europeia, o *MacPherson strut* apresentado na Figura 8, destaca-se por ser um sistema simples, leve, económico em termos de produção e ideal para veículos de tração dianteira.

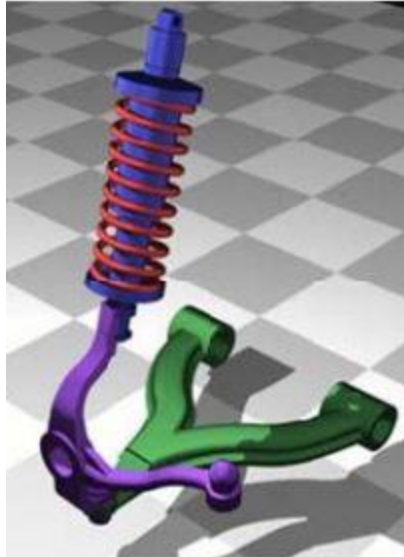


Figura 8 - *Macpherson Strut* [johnnysmultimedia]

Este sistema é composto de forma resumida por um conjunto de uma escora, uma mola e um amortecedor, que giram numa junta redonda ligada ao único braço inferior da direção do automóvel, que por sua vez se encontra ligado á roda. Nesta configuração a escora é que suporta todo o peso do automóvel, enquanto a mola e o amortecedor simplesmente fazem o trabalho de amortecimento (quando em bom estado, estes elementos também ajudam no suporte do peso do automóvel).

2.3.2 Suspensão com duplo *wishbone*

Esta implementação tem o seu nome atribuído de forma curiosa, uma vez que o *wishbone* ou osso da sorte é a forma que os braços que são ligados às rodas possuem.

A Figura 9 apresenta a estrutura desta suspensão que, apesar de muito complexa, apresenta excelentes características tais como permitir a grande aderência do automóvel à estrada, ser compacta logo ocupa menos espaço debaixo do automóvel e também permitir menos intrusão ao compartimento do motor, uma vez que a suspensão dianteira se encontra perto do local onde o motor é colocado.



Figura 9 - *Double wishbone* [double wishbone]

2.3.3 Suspensão de múltiplos elos (*Multi-link Suspension*)

Uma evolução da suspensão de duplo *wishbone* apresentada anteriormente, é a suspensão de múltiplos elos, a qual segue a mesma linha de construção com braços, mas ao invés de só existirem dois braços (um superior e um inferior), passam a existir mais que dois braços como é possível observar no exemplo da Figura 10.



Figura 10 - Suspensão de múltiplos elos (*Multi-link suspension*) [vwvortex]

A utilização destes múltiplos elos traduz-se numa infinidade de posições para a roda, que por sua vez faz com que o automóvel se adapte de forma correta à estrada, garantindo assim as melhores condições de aderência.

2.3.4 Suspensão com molas bobinadas e eixo fixo (*Solid-axle, coil-spring suspension*)

Uma solução simples para determinados tipos de veículos, como por exemplo camiões de carga, este tipo de suspensão é uma variação e uma atualização da suspensão que utiliza molas lâmina.

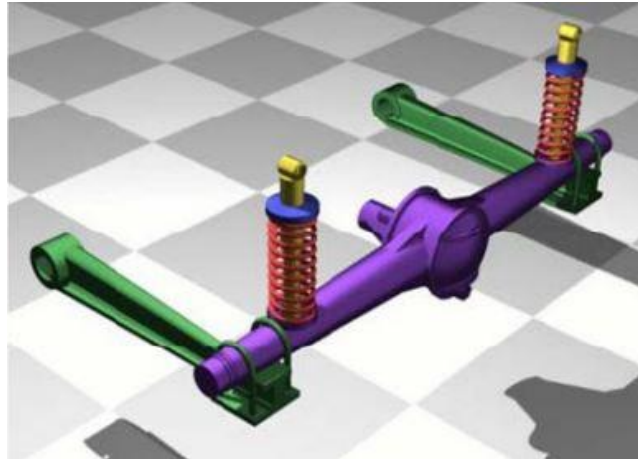


Figura 11 - *Solid-axle, coil-spring suspension* [johnnysmultimedia]

Esta suspensão, como mostra a Figura 11, passa a utilizar o conjunto de mola bobinada com amortecedor ao invés das molas do tipo lâmina, o que faz com que seja necessário introduzir no sistema apoios laterais para suportar melhor o peso do veículo.

2.4 Suspensões ativas e semi-ativas/adaptativas

Com o passar dos anos e com o grande desenvolvimento da eletrónica analógica e digital e dos sistemas controlados por computador, começaram a surgir diversas aplicações destas tecnologias em diferentes áreas, e como seria de esperar, a área automóvel também usufruiu destes desenvolvimentos surgindo as suspensões ativas. As suspensões ativas podem ser divididas em dois grupos principais:

- Suspensões semi-ativas
- Suspensões totalmente ativas

Ambas as suspensões tem a mesma função de controlar o movimento vertical das rodas em relação ao chassis do veículo, através de um sistema computadorizado, a ECU (*Engine Control Unit*) do veículo, coisa que nas suspensões passivas não está presente [cvel].

2.4.1 Suspensões semi-ativas

Nas suspensões ditas de semi-ativas a única coisa que é possível alterar é o coeficiente de viscosidade do amortecedor, o que por sua vez se traduz em tornar os amortecedores mais duros ou moles de acordo com o tipo de estrada/pavimento em que o automóvel se encontra.

As primeiras suspensões semi-ativas desenvolvidas fazem uso de válvulas controladas eletronicamente, as quais regulam o fluxo de óleo que se encontra presente no amortecedor em cada instante, como é possível observar na Figura 12. Isto permite obter um balanço entre uma suspensão dura que maximiza a manobrabilidade, uma suspensão mais mole que confere mais conforto, ou um estado intermédio, tudo isto de forma rápida uma vez que o ECU consegue reagir quase instantaneamente ao estado atual do automóvel.

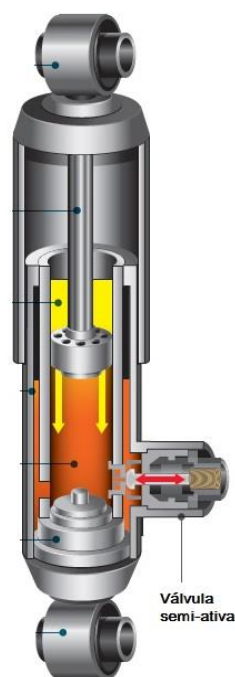


Figura 12 - Amortecedor com válvula semi-ativa

Implementações mais recentes na área das suspensões semi-ativas, utilizam amortecedores que em vez de serem enchidos com óleo, são cheios de um fluído que contém partículas metálicas que quando atuados por um campo eletromagnético externo alteram as propriedades de amortecimento do amortecedor. Basicamente, quando o fluído é submetido aos campos magnéticos, a sua viscosidade é alterada tornando o líquido mais sólido e mais resistente aos choques [Griffin], [johnnysmultimedia].

A constituição deste tipo de amortecedores é apresentada na Figura 13.

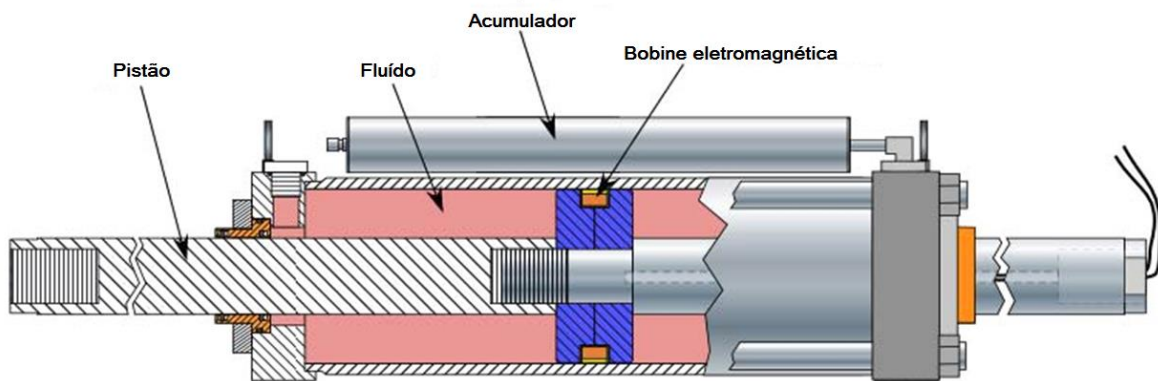


Figura 13 - Amortecedor de fluido magnético

2.4.1.1 Casos de estudo de suspensões semi-ativas

Um passo interessante depois de introduzidos os conceitos sobre suspensões semi-ativas é verificar de que forma este tipo de tecnologia é aplicado em automóveis de série.

A marca alemã Audi possui vários automóveis icônicos, ou pelo menos reconhecidos por muitos como dos melhores do mundo, sendo um desses modelos o Audi TT (Figura 14). O TT, é um pequeno desportivo que na sua segunda geração introduziu a suspensão *Magnetic Ride* que faz uso de amortecedores com fluído magnético, referido na secção anterior. A Audi consegue tirar o melhor proveito deste tipo de suspensões, uma vez que o carro tanto no modo de conforto como no modo desportivo, a suspensão consegue reagir de forma rápida e eficaz [gizmag].



Figura 14 - Audi TT 2ª Geração [performancecarstats]

2.4.2 Suspensões totalmente ativas

Ao contrário das suspensões semi-ativas que só conseguem controlar a viscosidade dos amortecedores, as suspensões ditas de totalmente ativas conseguem por elas próprias exercer forças diferentes e de forma independente, o que permite uma melhor adaptação da posição das rodas, assim como definir qual a força e de que forma é que cada uma delas absorve a energia transmitida pelas irregularidades do piso. Isto é feito com recurso a uma variedade de sensores, que enviam os seus sinais e dados diretamente para a ECU a frequências elevadas, de forma a garantir que a mesma consiga enviar rapidamente instruções aos servomotores e atuadores das suspensões ativas. Os servos existentes nas suspensões ativas dos automóveis são simples mecanismos que conseguem ler posições dos atuadores e das suspensões e enviar esses dados para a ECU.

A Figura 15 apresenta um pequeno diagrama de blocos que representa a estrutura básica de uma suspensão ativa [cvel].

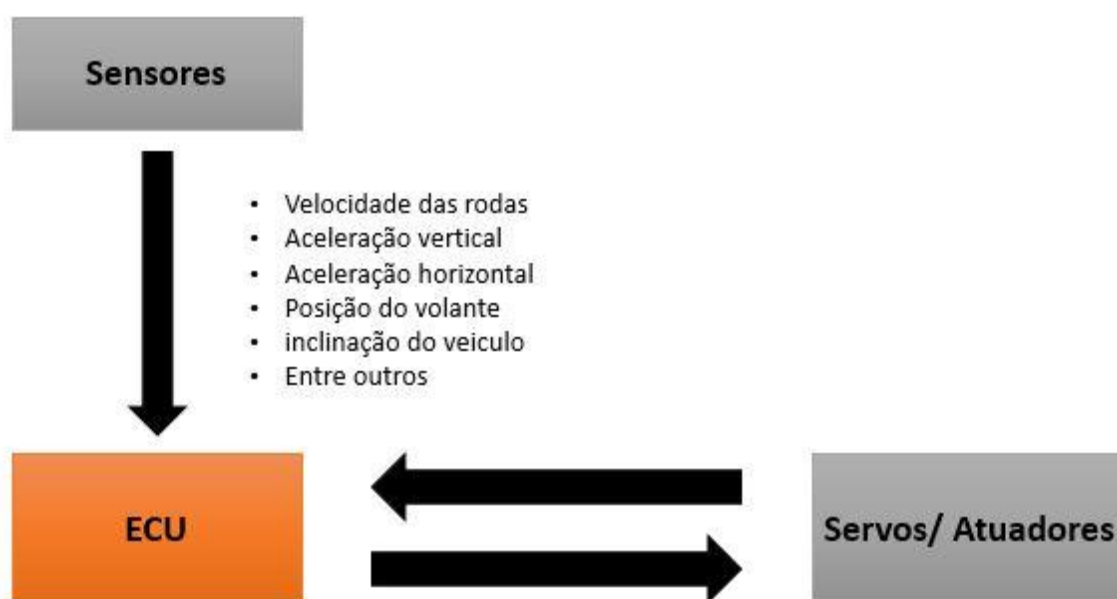


Figura 15 - Representação básica de uma suspensão ativa

Os fatores que podem influenciar as decisões da ECU quando esta atua nas suspensões podem ser diversos, por exemplo, se o veículo se encontrar a uma velocidade elevada as suspensões podem ser rebaixadas para trazer o centro de gravidade mais para baixo e assim dar mais estabilidade, ou quando o veículo efetua uma curva permitir às rodas do lado

interior à curva serem mais firmes para impedir que o veículo capote. As suspensões ativas podem ser adaptadas em tempo real, de facto muitas das suspensões ativas modernas possuem botões que permitem ao condutor alterar a configuração da suspensão manualmente para outro perfil, por exemplo, o botão *SPORT* de muitos carros permite ao condutor forçar uma suspensão muito mais dura o que troca uma condução confortável por uma condução mais estável e desportiva.

Dentro das suspensões ativas podemos distinguir dois tipos diferentes, que servem como base, ou como desenvolvimentos iniciais dentro da área. Estes dois tipos são as suspensões atuadas hidraulicamente e as eletromagnéticas. As suspensões hidráulicas como o nome indica fazem uso de mecanismos hidráulicos para ajustar o nível do veículo em relação ao solo, assim como qual a pressão que cada amortecedor deverá possuir em função das condições tanto do solo como do regime do veículo. A pressão hidráulica necessária para atuar os servos hidráulicos é proveniente de uma bomba hidráulica de alta pressão que permite consoante as ordens do ECU distribuir as pressões corretas por todos os amortecedores de forma quase instantânea.

As suspensões eletromagnéticas, também designadas de eletromagnéticas regenerativas, possuem motores eletromagnéticos lineares ligados a cada uma das rodas, os quais são capazes de responder de forma extremamente rápida a todos os tipos de situações e ordens que o ECU lhes enviar. Um problema inerente à utilização de suspensões completamente ativas é a quantidade de energia que elas consomem dentro do sistema, o automóvel. O facto de os motores serem eletromagnéticos permite que estes sejam utilizados como geradores o que resolve o problema do consumo de energia.

2.4.2.1 Casos de estudo de suspensões totalmente ativas

Depois de apresentados alguns tipos mais gerais de suspensões totalmente ativas, e de forma a se perceber de que forma estes sistemas foram implementados por empresas automóveis, serão apresentados alguns exemplos de suspensões ativas existentes ou que foram passos importantes no desenvolvimentos das mesmas.

Conhecida por conduzir diversas investigações a ter criado diversos produtos na área do som, a empresa Bose, propôs-se a si mesma a tentar desenvolver um sistema que conseguisse melhorar o conforto dos veículos. Para isso eles desenvolveram uma suspensão ativa com recursos motores eletromagnéticos lineares, amplificadores e algoritmos de controlo. Os

motores eletromagnéticos lineares, quando lhes é aplicada uma carga elétrica, estendem-se e contraem-se de forma a criar movimento entre as rodas e a carroçaria. Esta estrutura pode ser visualizada na Figura 16.

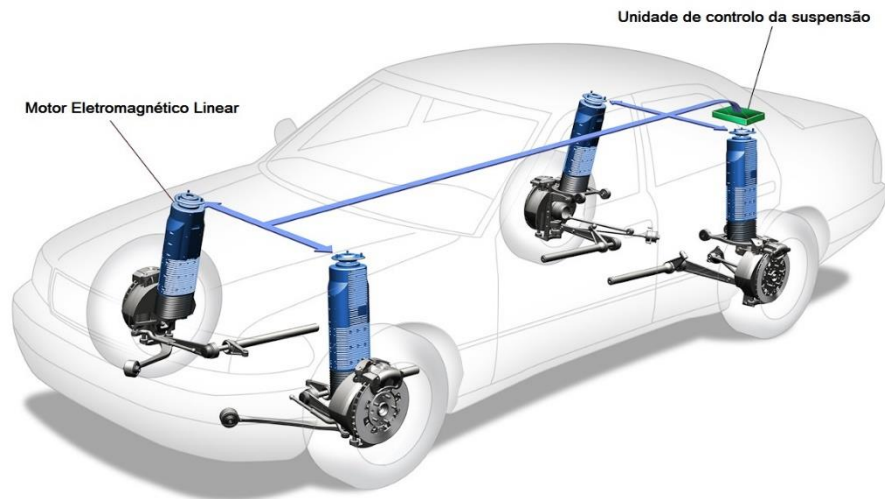


Figura 16 - Suspensão Bose [extremetech]

Esta suspensão foi apresentada em 2004 onde foi demonstrada a diferença entre suspensões tradicionais e a nova suspensão desenvolvida. Foi possível observar que a suspensão ativa da Bose apresentava bons resultados em diferentes testes, como em curvas rápidas onde parou de se verificar uma inclinação perigosa do veículo, como mostra a Figura 17, ou pela passagem por lombas de altura moderada, onde se verificou que o veículo também já não apresentava grandes oscilações verticais, como é possível verificar na Figura 18 b) onde o carro se encontra nivelado com a estrada.



Figura 17 - Veículo a curvar: a) Sem suspensão Bose; b) Com suspensão Bose [bose]



Figura 18 - Passagem por uma lombada: a) Sem suspensão Bose; b) Com suspensão Bose [bose]

Apesar dos resultados brilhantes e das inúmeras vantagens que esta suspensão trazia, quando implementada acabou por não passar muito para veículos comerciais por inúmeras razões, sendo a principal os desenvolvimentos da concorrência. Nesta altura fabricantes como a BMW e a General Motors apresentavam as suas propostas para suspensões mais modernas, mais simples quando comparadas à desenvolvida pela Bose e principalmente mais baratas [extremetech], [bose].

Passando agora para os desenvolvimentos mais recentes na área das suspensões ativas, a Mercedes apresentou uma inovadora forma de implementar uma suspensão ativa, misturando o sistema existente de suspensão ativa por eles desenvolvido, o ABC (*Active Body Control*), com modernas formas de aquisição de dados. Este novo sistema designado

pela marca por MBC (*Magic Body Control*) acrescenta uma capacidade de reconhecer os troços de estrada e as suas condições antes de o veículo passar por eles, com um certo limite de alcance e em tempo real [mercedes-benz].

Para fazer este reconhecimento, é utilizada uma câmara estereoscópica montada na zona do para-brisas do veículo como mostra a Figura 19.



Figura 19 - Reconhecimento de estradas (*Magic Body Control*) [bimmerfest]

Depois de fazer o reconhecimento da superfície da estrada, o veículo ajusta cada um dos seus amortecedores hidráulicos, para que quando passar pelas irregularidades previamente reconhecidas, estar com as configurações que permitem a melhor conforto dos passageiros [500sec].

3. CONTROLADORES DIFUSOS

Muitos dos equipamentos que estão presentes no nosso quotidiano, tais como pequenos aparelhos, os grandes eletrodomésticos ou os automóveis, possuem componentes que realizam o seu controlo, quer seja para controlar o volume de áudio, a temperatura, ou até mesmo a quantidade de água que entra numa máquina de lavar. Muitas destas aplicações fazem uso do controlo dito de clássico. Este controlo tende a ser preciso e pouco flexível, no sentido em que tem que existir certeza nos valores, por exemplo, 1 se for “sim” e 0 se for “não”, na teoria clássica não pode existir um talvez, em termos numéricos seria um valor 0 ou 1, o que como é óbvio tem as suas vantagens e desvantagens.

Com o passar dos tempos surgiu uma nova forma de controlo que faz uso de um método que lida com incertezas, chamada de lógica difusa ou *fuzzy logic*. Esta lógica difusa utiliza em vez de números fixos como 0 e 1, termos linguísticos mais comuns que conseguem tratar de uma melhor forma as situações como o “talvez”, os meios-termos entre o 0 e o 1, os quais não são contemplados no controlo clássico.

3.1 Breve história

Desde há alguns anos que a lógica difusa e os controladores difusos tem vindo a ter uma grande exposição, no que toca às suas aplicações nos mais diversos setores. Estes setores são por exemplo ao nível doméstico onde existem vários pequenos e grandes eletrodomésticos, ou no setor industrial com a maquinaria pesada, onde o controlo é extremamente importante, devendo ser preciso.

A ideia de uma lógica difusa foi sugerida em diferentes artigos publicados entre 1968 e 1972, e descrita mais detalhadamente em 1973 por Zadeh. A primeira grande implementação pioneira destes novos métodos, foi feita por Mamdani e Assilian em 1974 a qual consistiu no controlo de uma máquina a vapor. Nos anos que viriam a seguir-se, a lógica e o controlo difuso seriam compreendidos por mais pessoas o que levou a novas e diversas aplicações.

Com destaque no Japão, o uso da lógica difusa para o controlo de processos foi muito estudada, com a finalidade de ser utilizada nas mais diversas áreas, algumas das quais foram, a operação automática de comboios, o controlo de veículos, o controlo de estabilidade, entre outros.

Atualmente, existem muitas patentes registadas com o uso de lógica difusa, o que nos leva a pensar que esta ainda poderá vir a estar presente em mais produtos e em áreas cada vez mais diversificadas [1988, Zadeh].

3.2 Lógica difusa

Como já foi referido, a lógica difusa é mais vaga e natural do que a lógica clássica, o que faz com que seja mais focada na significância do que na precisão, quando é utilizada para descrever determinados acontecimentos.

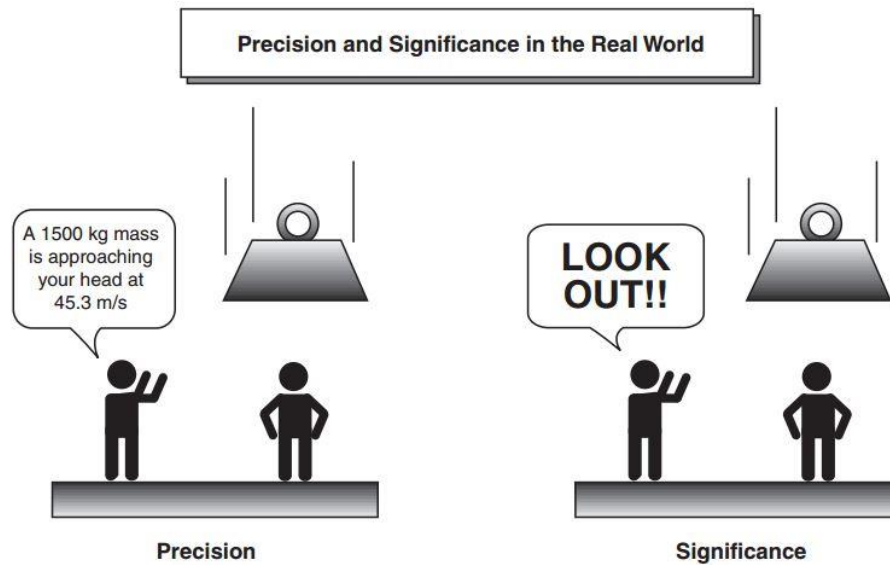


Figura 20 – Precisão e significância [FLTool]

A Figura 20 ilustra um exemplo onde a mensagem a transmitir pode melhorar as probabilidades de uma pessoa evitar o perigo. Se a mensagem for demasiado precisa, onde especificamos todos os detalhes sobre a massa que está a cair, a pessoa pode nem entender a maior parte dos dados e nem saber que se encontra em perigo; pelo contrário, se a nossa mensagem for mais vaga como “cuidado!” ou “atenção!” conseguimos transmitir à pessoa que ela se encontra em perigo.

A lógica difusa é então um método conveniente de mapear um conjunto de entradas num conjunto de saídas, visto que esta operação é um ponto de partida para praticamente tudo. Outro exemplo muito utilizado por diversos autores para explicar este mapeamento, e também de que forma a lógica difusa pode ser mais vantajosa face a outras soluções, é o problema da gorjeta. Este problema permite também aplicar os conjuntos difusos e compará-los a conjuntos clássicos, a seguir apresentados. As próximas subsecções apresentam os principais componentes da lógica difusa.

3.2.1 Conjuntos difusos *versus* Conjuntos clássicos

No exemplo da gorjeta, o que é pretendido é determinar quanto deverá ser a gorjeta correta a dar numa refeição, dado uma determinada qualidade de serviço e da comida, como ilustra a Figura 21.

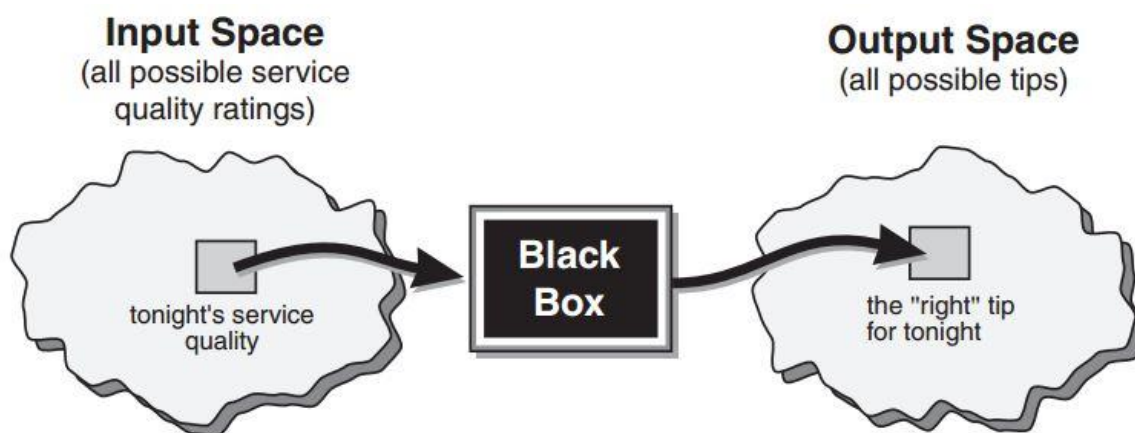


Figura 21 – Problema da gorjeta [FLTool]

Neste caso, o nosso espaço de entradas é a qualidade de serviço da refeição e da comida, que pode apresentar uma variada gama de valores, como “Bom”, “Mau”, “Excelente”, tudo expressões vagas e não exatas. O nosso espaço de saídas é a gorjeta que se deve dar de acordo com a qualidade de serviço e, à semelhança das entradas, esta também pode ser definida com expressões mais humanas como “Pequena” ou “Generosa”. A caixa negra que processa e transforma a entrada na saída pode ser definida como um de vários sistemas existentes, tais como sistemas difusos, sistemas lineares clássicos entre muitos outros.

Se abordássemos este problema de forma clássica utilizando um sistema linear, poderíamos definir dois conjuntos de números de 0 a 10 que representassem a qualidade do serviço e da comida e definir corretamente uma função para obter a gorjeta. Se utilizarmos *softwares* como o MATLAB para desenhar todas as soluções possíveis obteríamos uma solução com o seguinte aspeto.

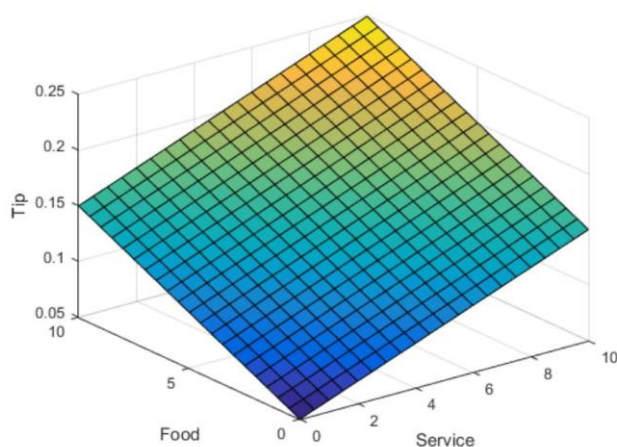


Figura 22 – Solução linear [FLTool]

Esta solução pode parecer boa mas não o é, porque é demasiado linear e não reflete de forma correta qual o valor certo da gorjeta, tendo em conta ambas as entradas. Para isso poderíamos definir pesos diferentes para cada uma delas, por exemplo, se acharmos que a qualidade de serviço é mais importante para o valor total da gorjeta podemos dar-lhe um maior peso que a qualidade da comida. Mesmo fazendo estas alterações a resposta obtida acaba por ser muito semelhante á anterior.

Suponhamos agora que queremos criar intervalos, regras simples onde se a comida e o serviço estiverem dentro de determinados valores, o valor da gorjeta é verificado. A Figura 23 mostra um exemplo da existência destes limites, onde se pretende que existam 3 zonas ou conjuntos de soluções nas quais o valor da gorjeta pode ser encontrando.

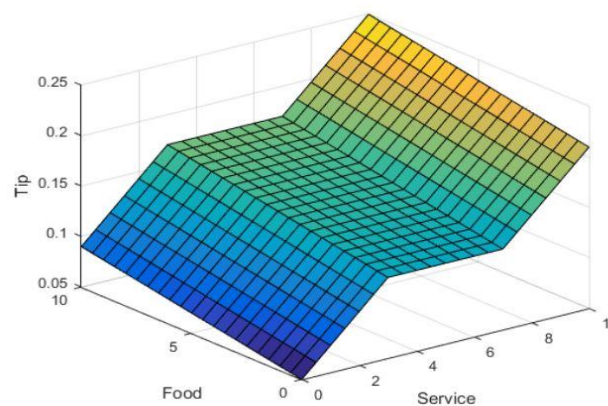


Figura 23 – Solução linear (intervalos fixos) [FLTool]

Apesar de ser uma solução que consegue ser precisa e eficaz para o que foi definido, em termos de programação esta solução é muito complexa. Isto porque se mais tarde for necessário efetuar alguns ajustes à mesma, pode vir a tornar-se demasiado complicado para a pessoa que pensou nesta mesma solução, e para uma pessoa que a deseje usar ou alterar, mas que nunca viu nem esteve presente durante o seu desenvolvimento da aplicação, torna-se ainda mais difícil.

Abordando agora o mesmo problema mas recorrendo a lógica difusa, verifica-se que este método é mais natural, uma vez que se recorre a termos mais gerais e comuns do dia-a-dia. Como queremos ter em conta tanto a comida como o serviço, podemos definir regras como:

- Se o serviço é pobre ou a comida é má, então a gorjeta é pouca

- Se o serviço é bom, então a gorjeta é mediana
- Se o serviço é excelente ou a comida é deliciosa, então a gorjeta é generosa

O que se pode verificar logo à partida é que só estas 3 simples regras conseguem resolver praticamente todos os cenários possíveis para o valor da gorjeta, ao contrário das equações lineares extensas e complexas que dão origem à solução apresentada na Figura 23. Outro aspeto relevante é que as regras definidas utilizam termos simples, como “pobre” e “bom” que definem gamas de valores, ligados por operadores linguísticos como “se”, “ou”, “então”, que funcionam como operações matemáticas mais simples para definir intervalos flexíveis, e onde pode existir uma espécie de dúvida mas no bom sentido. Por exemplo, pode existir um espaço onde a comida nem é má nem é boa, pelo que é uma situação intermedia que a lógica difusa consegue interpretar e utilizar, o que não é possível na lógica linear.

Estas regras são também as operações que vão ser introduzidas no nosso sistema difuso, regras definidas em poucos minutos e sem cálculos matemáticos. Cada termo define uma gama de valores, e consoante as nossas entradas obtemos a respetiva saída. A resposta que se obtém utilizando lógica difusa pode ser a observada na Figura 24.

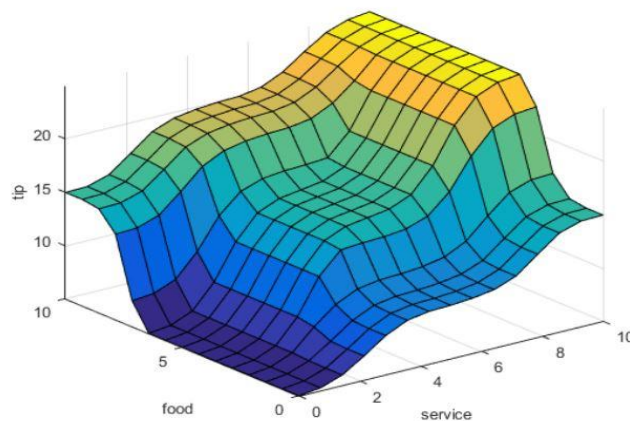


Figura 24 – Solução utilizando lógica difusa [FLTool]

A solução obtida com recurso à lógica difusa é bastante mais diversificada e flexível apresentando uma melhor forma de definir qual o valor da gorjeta. Uma das grandes vantagens desta abordagem é que se fosse necessário realizar alguma alteração, como adicionar, remover ou alterar algum aspeto do sistema, simplesmente era necessário mexer nas regras definidas anteriormente o que acaba por ser extremamente simples quando comparado aos sistemas lineares.

Este exemplo serve para demonstrar uma das principais diferenças entre os conjuntos difusos e os conjuntos clássicos, nomeadamente, o facto de os conjuntos clássicos serem limitados a números e valores fixos, e os conjuntos difusos serem mais flexíveis e permitirem a existência de zonas intermedias. A Figura 25 ilustra esta diferença de forma a tornar mais compreensível o conceito apresentado durante a explicação do problema da gorjeta [FLTool].

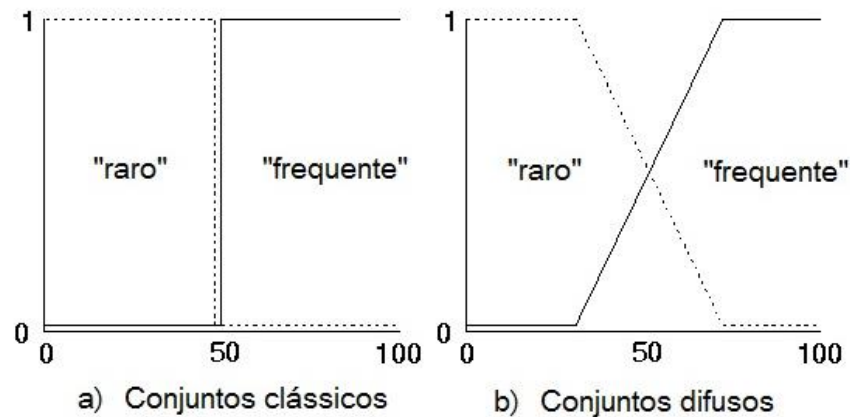


Figura 25 – Representação dos conjuntos clássicos e difusos [Platen, Kampichler]

3.2.2 Sistemas difusos

Depois de introduzido o conceito de lógica difusa e as suas vantagens face à utilização de lógica não difusa, interessa apresentar com maior detalhe quais os elementos principais dos sistemas difusos.

3.2.2.1 Funções de pertença

O primeiro elemento, e um dos mais importantes, é a função de pertença. As funções de pertença permitem atribuir a cada elemento de cada conjunto valores entre $[0,1]$ e assim caracterizar o seu peso/importância para o sistema. Existem vários tipos de funções de pertença que permitem ajustar melhor o peso de cada elemento de acordo com o pretendido pelo programador e, tratando-se de um sistema difuso estas também podem ser moldadas, dentro de determinados limites, para se ajustarem ainda melhor. A Figura 26 apresenta os tipos mais comuns de funções de pertença existentes.

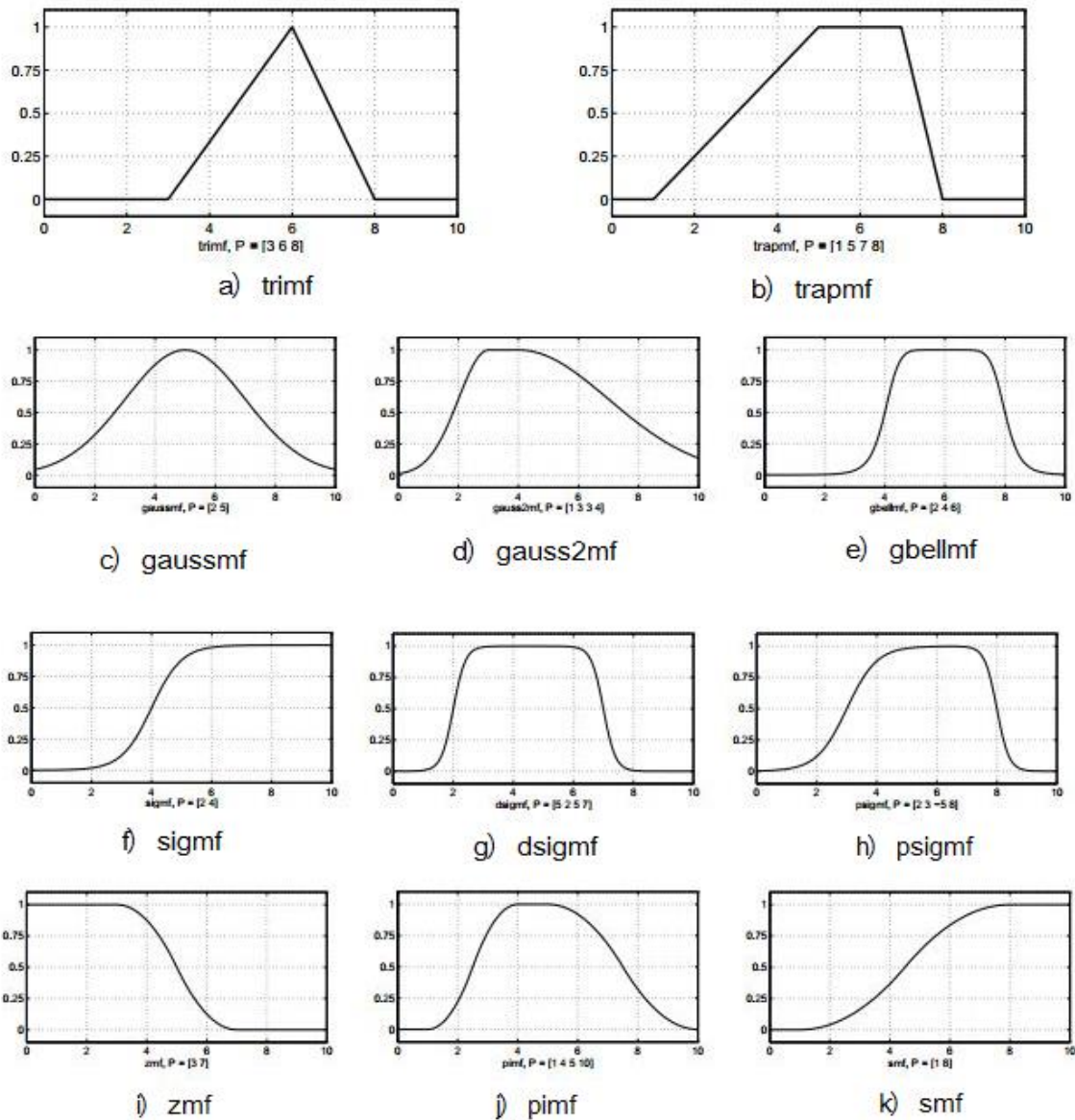


Figura 26 – Funções de pertença [FLTool]

Dentro dos diferentes tipos de funções de pertença existem as mais simples, compostas só por linhas retas, as quais formam funções triangulares e trapezoidais (Figura 26 a) e b)). Existem também funções de presença que são baseadas nas curvas *Gaussianas*, as quais promovem a fluidez das respostas, sendo uma a simples curva *Gaussiana* (Figura 26 c)) e a outra uma curva composta por duas dessas curvas (Figura 26 d)). Outras funções baseiam-se em funções sigmoidais, que são funções muitas vezes assimétricas, fechadas ou abertas. Estas podem ser a diferença ou o produto entre duas sigmóides (Figura 26 f), g) e h)). O último conjunto de funções (Figura 26 i), j) e k)) diz respeito a funções que tem por base curvas polinomiais.

3.2.2.2 Termos linguísticos

O segundo dos elementos já foi referenciado diversas vezes, os termos linguísticos. Como referido, os termos ou variáveis linguísticas são a forma de definir as variáveis a qual pode assumir vários valores. Estas variáveis são sempre definidas para um certo número de funções de presença, cada uma representando um valor ou conceito que a variável pode tomar.

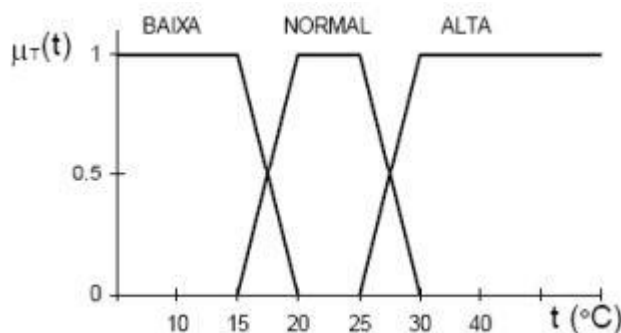


Figura 27 – Variáveis linguísticas [Sisca]

A Figura 27 mostra um exemplo da utilização das variáveis linguísticas. Existe um universo que neste caso é a temperatura ambiente de uma sala, sendo à função de pertinência atribuído um termo linguístico. Isto significa que todos os valores que se encontrem, por exemplo, dentro da primeira função de pertinência resultam numa temperatura baixa. Dentro de cada um dos conjuntos também podemos modificar as suas propriedades ao acrescentar termos como “pouco”, “muito”, “mais ou menos” que conferem uma maior dinâmica a cada conjunto.

3.2.2.3 Termos conectivos e regras

De forma a articular todas as variáveis existentes num sistema difuso, são utilizados termos que ligam cada variável como o “e” e o “ou”. Estes termos funcionam como as operações de união e interseção dos conjuntos clássicos, de onde resultam outros conjuntos mais complexos mas que são mais simples de compreender devido á natureza linguística da lógica difusa.

A correta utilização e articulação de todos os termos e variáveis linguísticas dão origem às regras difusas referidas em secções anteriores. Estas regras deduzem as informações sobre uma variável existente na sua conclusão, a partir da informação contida na sua premissa. Por exemplo:

➤ Exemplo 1

- **Se** velocidade é lenta
- **Então** fazer aceleração alta

➤ Exemplo 2

- **Se** temperatura é baixa
- **E** pressão é media
- **Então** fazer velocidade muito baixa

Em ambos os exemplos, conseguimos inferir qual a informação ou gama de valores que devemos considerar para uma determinada variável da nossa conclusão, através da informação de uma ou mais (conjunto) variáveis existentes nas frases antecedentes à conclusão [Sisca].

3.2.3 *Toolbox* de sistemas difusos do *Matlab*

De forma a se definir um sistema difuso funcional, o *software Matlab* apresenta um conjunto de ferramentas, o qual permite facilmente configurar todos os elementos constituintes do sistema difuso, referidos anteriormente. Quando é iniciado um novo sistema difuso é apresentado uma interface simples, como mostra a Figura 28.

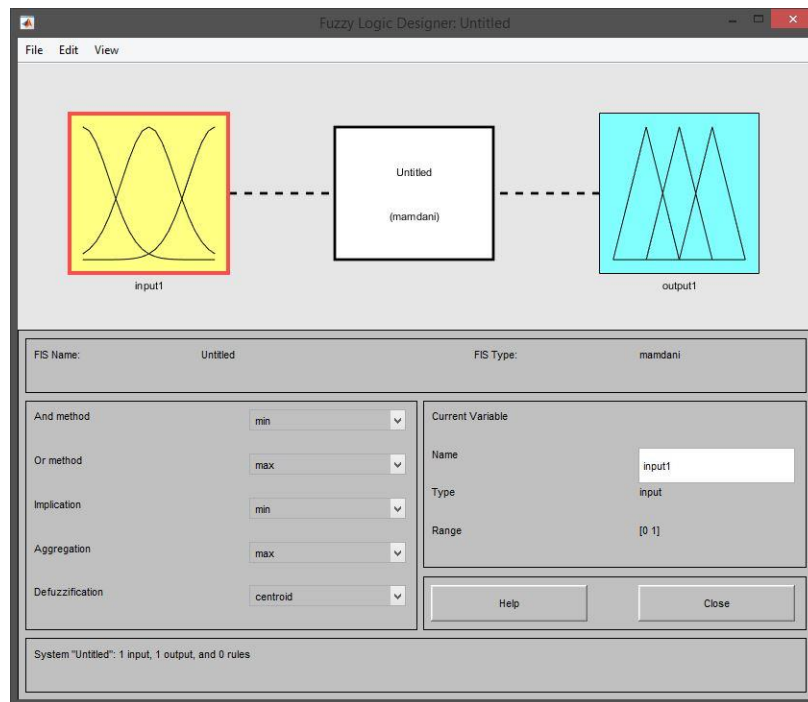


Figura 28 – Interface de criação de lógica difusa

Como é possível verificar, neste primeiro interface observamos as entradas e as saídas do nosso sistema difuso, assim como o tipo de mecanismo de inferência que se irá realizar, em conjunto com as regras e com as operações difusas, de forma a permitir o bom funcionamento de todo o sistema. A Figura 29 mostra um sistema configurado com duas entradas e uma saída, de forma a poder continuar a explicação da *toolbox*.

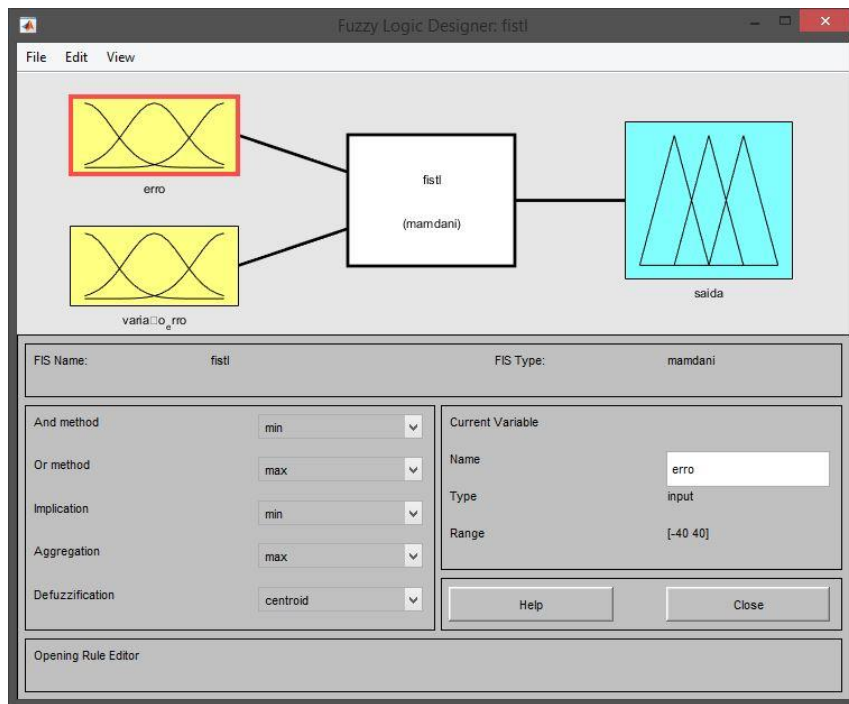


Figura 29 – Exemplo de sistema difuso simples

Para este sistema difuso foram definidas as funções de pertença para cada termo linguístico escolhido, definindo assim os intervalos de valores em que estes estão ativos. A Figura 30 mostra, como exemplo ilustrativo, as funções de pertença definidas para a variável de entrada “erro”, uma vez que para definir outras variáveis é utilizado o mesmo procedimento.

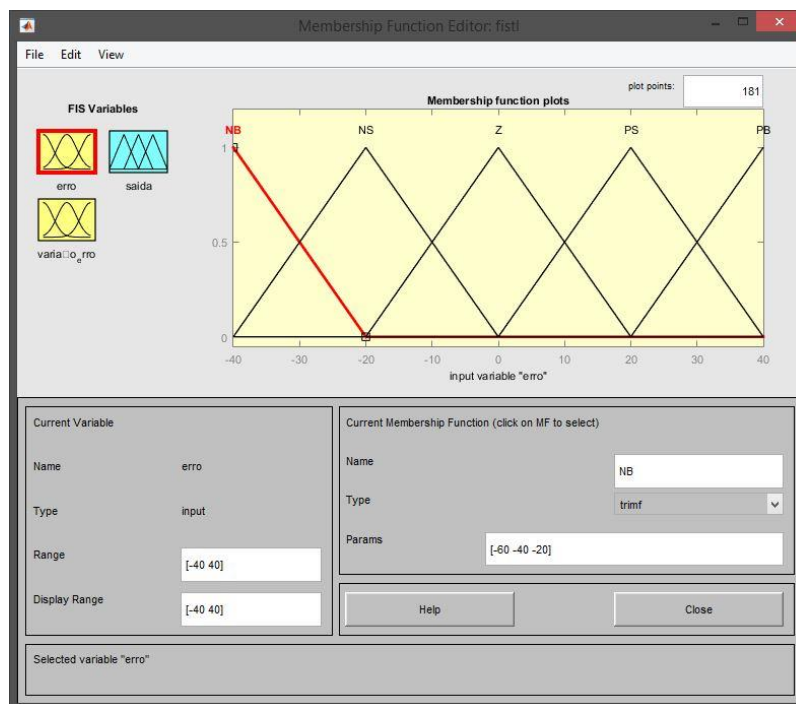


Figura 30 – Exemplo de funções de pertença

No interface que permite desenvolver as diferentes funções de pertença de cada variável do sistema, é possível, de uma forma fácil, alterar qualquer uma das funções de forma a otimizar o funcionamento do sistema, fazendo-se assim a sintonia do controlador difuso. Esta sintonia pode ser feita de forma livre, arrastando as diferentes funções de pertença por toda a janela onde estas estão contidas, ou se for necessário uma maior precisão, alterando manualmente os parâmetros individuais de cada um das funções de pertença existente.

De forma a ligar as diferentes variáveis de entrada com as variáveis de saída do sistema, o passo seguinte é definir as regras. O interface apresentado pela Figura 31 permite utilizar os diferentes termos conectivos para ligar as várias funções de pertença de cada variável, de forma a obter o funcionamento desejado.

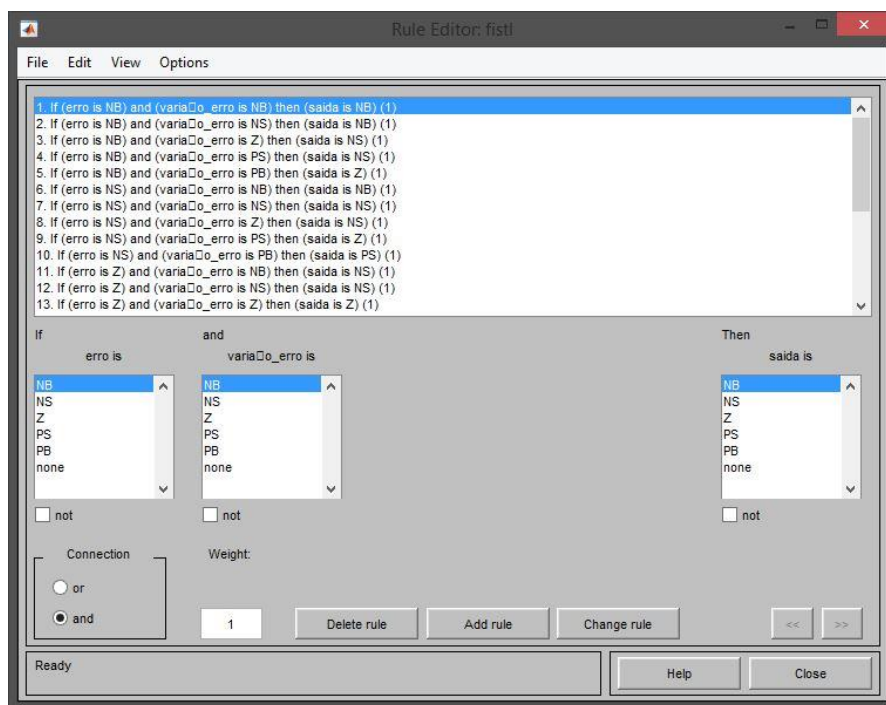


Figura 31 - Exemplo de funções de regras difusas

Neste interface, como é possível observar, estão presentes diferentes caixas cada uma representando as diferentes variáveis definidas anteriormente. Cada caixa tem dentro um conjunto de opções, as quais correspondem aos nomes atribuídos pelo utilizador às diferentes funções de pertença (excluindo a “none” que aparece por predefinição, e que representa não escolher nenhuma das funções de pertença). Para interligar cada um dos termos é possível escolher que tipo de termo conetivo se pretende utilizar, se queremos a interseção das funções (termo “AND”) ou a reunião dos conjuntos (termo “OR”).

O último aspeto importante sobre esta *toolbox* é a vantagem de se conseguir observar o comportamento do sistema programado antes de o introduzir no sistema a controlar. Isso pode ser feito através de duas ferramentas. A primeira é pela observação da superfície de resultados como mostra a Figura 32.

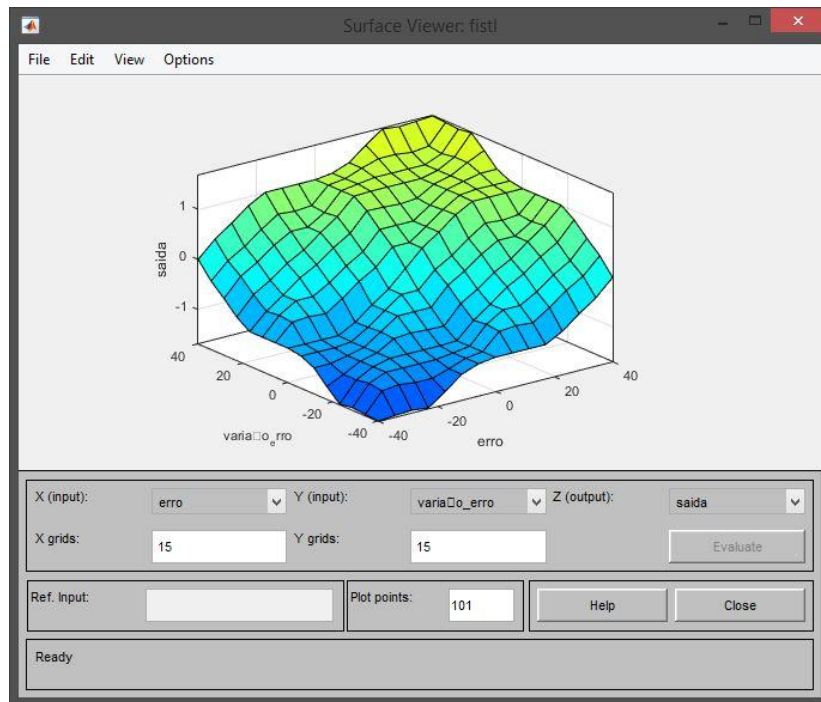


Figura 32 – Exemplo de superfície de resultados

Através da análise da superfície de resultados, é possível retirar algumas conclusões sobre o funcionamento do sistema difuso, no entanto, este método pode ser mais impreciso do que a ferramenta seguinte. A Figura 33 mostra a segunda ferramenta que serve para analisar o comportamento do sistema difuso desenvolvido, antes de este ser aplicado no sistema a controlar.

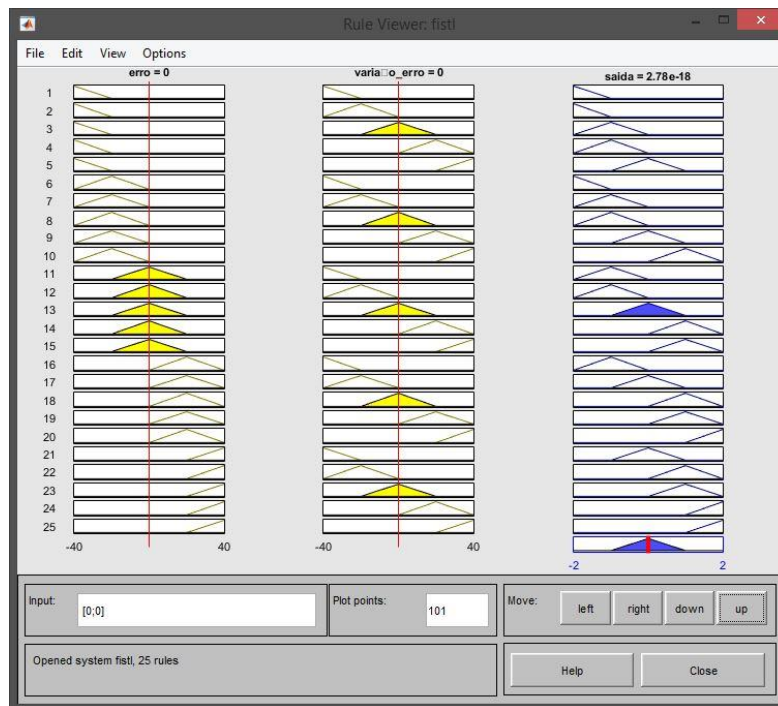


Figura 33 – Visualizador de regras

Esta ferramenta, que iremos designar de visualizador de regras, serve para ver com maior detalhe o comportamento das saídas quando determinadas combinações de entradas são introduzidas. Neste caso, o sistema possui duas entradas, sinalizadas com a cor amarela, e uma saída sinalizada com a cor azul. A linha vermelha existente em ambas as entradas pode ser deslocada para a esquerda e para a direita de forma a se escolher em que zona da gama de valores e função de pertença das entradas poderá estar, e para além disso, se verificar em tempo real em qual das gamas de valores as saídas se encontram.

Desta forma, ficam apresentadas as principais funcionalidades da *toolbox* para sistemas difusos existente no *Matlab*, e de que forma estas funcionalidades permitem otimizar por completo os sistemas difusos desenvolvidos.

3.3. CONTROLADOR DIFUSO

Os controladores difusos fazem uso de todos os conceitos abordados sobre lógica difusa, recebendo valores reais que são processados recorrendo à lógica difusa e devolvendo valores reais. Para isso, os elementos que compõem um controlador difuso tem que ser capazes de aceitar valores reais, transforma-los em elementos difusos, processar as informações de forma correta e no final transforma-los de volta em valores reais com vista a uma melhor compreensão pelo utilizador.

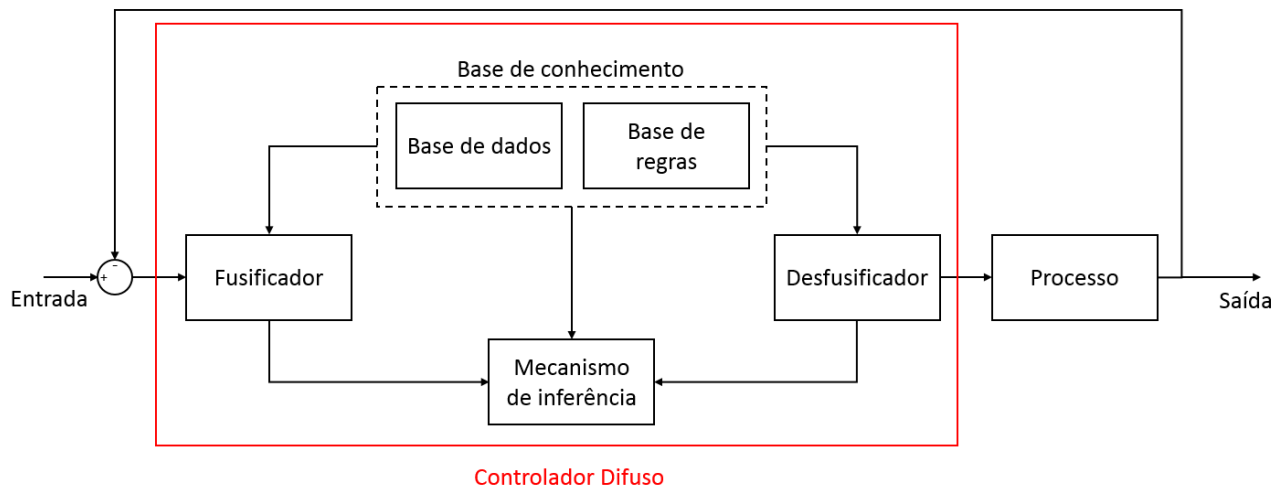


Figura 34 – Sistema de controlo difuso

A Figura 34 representa um sistema de controlo difuso, onde está presente um controlador difuso e a sua estrutura. O controlador difuso é composto por [Sisca]:

- Fusificador (ou módulo de difusão);
- Base de conhecimento, composta por uma base de dados e uma base de regras;
- Mecanismo de inferência;
- Desfusificador (ou módulo de colapsagem);

De seguida irão ser aprofundadas quais as principais características de cada um destes elementos, e de que forma cada um contribui para o bom funcionamento de um controlador difuso.

3.3.1 Fusificador

O primeiro módulo é encarregue de converter os valores reais/clássicos em dados e valores difusos, de forma a estes poderem ser utilizados pelo controlador. Este módulo é também responsável por fazer um mapeamento inicial destes valores em funções de pertença que mais tarde podem ser ajustadas.

3.3.2 Base de conhecimento

Sendo composto por duas partes, a base de dados e a base de regras, a base de conhecimento tem como objetivo fazer a correspondência das variáveis linguísticas de entrada com os valores linguísticos de saída, com recurso às regras existentes.

A base de dados fornece a informação (funções de pertinência e fatores de escala das mesmas) necessária para o bom funcionamento, tanto do fusificador como do defusificador.

- **Base de dados:** A base de dados é onde estão contidas as funções de pertinência e os seus respetivos fatores de escala, que são a informação necessária para o bom funcionamento dos módulos de difusão e colapsagem do controlador difuso.
- **Base de regras:** Onde estão contidas todas as regras definidas pelo programador, que são necessárias para o controlador atingir os resultados pretendidos e da forma pretendida.

3.3.3 Mecanismo de inferência

De forma a conferir ao controlador difuso um modo de funcionamento semelhante à lógica humana, é introduzido o mecanismo de inferência. De certa forma, este mecanismo simula o raciocínio humano da tomada de decisões, dependendo das características e estímulos presentes num dado instante de tempo.

Este é sem dúvida, um dos elementos mais importantes, uma vez que dita de que forma é que o controlador toma as diversas decisões, as quais podem ser mais ou menos acertadas dependendo da situação. Ao longo dos tempos, existiram abordagens diferentes de como deveria funcionar este mecanismo de inferência o qual acabou por dar origem aos dois mais utilizados nos dias de hoje, o sistema de inferência de Mamdani e o sistema de inferência de Sugeno.

3.3.3.1 Sistema de inferência Mamdani

Este sistema de inferência foi proposto como o nome indica, por Ebrahim Mamdani em 1975, e surgiu quando este tentava efetuar o controlo de uma máquina a vapor através da utilização de regras linguísticas, obtidas através de operários humanos experientes. Mamdani inspirou-se em artigos de Lofti Zadeh que descreviam processos de decisão e algoritmos difusos para sistemas complexos.

O sistema de inferência do tipo Mamdani utiliza as saídas na forma de funções de pertinência, que depois vão passar por um passo de defusificação e só depois utilizadas pelo sistema de controlo. Este modo de funcionamento faz com que o sistema de inferência seja mais intuitivo e de certo modo, mais humano. Mas o facto de ter que efetuar a defusificação de

cada conjunto de funções de pertença na saída implica dedicar não só tempo como poder computacional, o que pode comprometer o bom funcionamento do sistema [FLTool].

3.3.3.2 Sistema de inferência Sugeno

O sistema de inferência Sugeno, ou Takagi-Sugeno-Kang, foi introduzido em 1985, e em vários aspetos é semelhante ao sistema introduzido por Mamdani.

São semelhantes uma vez que os primeiros passos do processo de inferência, fusificação e aplicação dos operadores difusos, são exatamente iguais. Mas, enquanto o sistema do tipo Mamdani utiliza as funções de pertença de saída e as desfusifica, o sistema do tipo Sugeno efetua a média ponderada para determinar a saída do sistema. Devido ao facto de as saídas serem determinadas desta forma, torna as operações mais rápidas e eficientes, mas perde-se a natureza intuitiva e facilmente interpretáveis existentes nos sistemas do tipo Mamdani [FLTool], [Kaur].

3.3.4 Desfusificador

O último módulo existente num controlador difuso, funciona de forma contrária ao primeiro. Enquanto no primeiro módulo é pretendido converter os valores reais em valores de gamas difusas, no último, o pretendido é utilizar os valores difusos determinados e converte-los para valores que possam ser utilizados em ações de controlo.

3.4. CASOS DE ESTUDO E FUTURAS EVOLUÇÕES

Depois de apresentar quais os componentes e o funcionamento dos controladores difusos, é interessante apresentar exemplos onde este tipo de tecnologia está implementada, demonstrando-se assim que a lógica difusa pode ser integrada em diversas áreas.

3.4.1 Máquina de lavar roupa [Alhanjouri]

O primeiro caso de estudo apresentado, é no mínimo invulgar, uma vez que se trata da aplicação da lógica difusa numa máquina de lavar a roupa.

Neste caso, o autor analisa o facto de diferentes tipos de tecidos e roupas necessitarem de tempos diferentes, isto devido à quantidade de sujidade, ao tipo de sujidade entre outros fatores. As máquinas tradicionais tem programas fixos que o utilizador tem que selecionar de acordo com a análise que este faz da carga de roupa que insere na maquina. A máquina de lavar com controlador difuso, proposta pelo autor, pretende através de duas entradas

simples, o tipo de sujidade e o grau de sujidade (ou quantidade de sujidade presente nas roupas), determinar qual o tempo de lavagem da roupa. Para detetar as entradas são instalados sensores que conseguem efetuar a deteção das entradas.

O sistema difuso desenvolvido é constituído por duas variáveis de entrada, cada uma com 3 funções de pertença e uma variável de saída com 5 funções de pertença. O autor também definiu um conjunto de regras que fazem corresponder as entradas à saída, de acordo com o desejado. Simulando todo o sistema, a superfície obtida é a apresentada pela Figura 35.

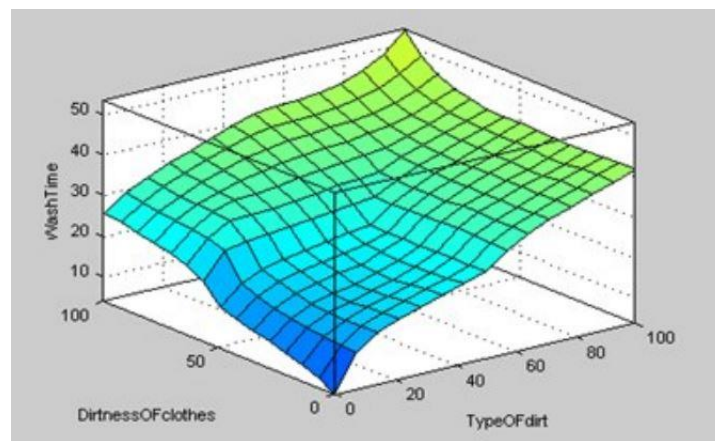


Figura 35 – Superfície de respostas [Alhanjouri]

3.4.2 Semáforo de trânsito [Antunović]

Um segundo caso de estudo para aplicações da lógica difusa será uma espécie de semáforo inteligente, que tem como finalidade diminuir o tempo de espera dos veículos e por consequência diminuir as longas filas de espera.

Os semáforos convencionais funcionam à base de temporizadores fixos, ou seja, existem janelas de tempo fixas para cada uma das situações que podem surgir numa rua com semáforos, como por exemplo, estar verde para automóveis num sentido, verde para os peões atravessarem a passadeira noutro sentido, entre outros. Isto apresenta bastantes inconvenientes, principalmente em termos de tempo perdido, a situação mais fácil de observar estes problemas é no caso de estar verde quando não existem viaturas nesse sentido, obrigando os restantes sentidos a esperar pelo fim do temporizador.

Neste caso, o autor estudou os semáforos existentes num entroncamento, como mostra a Figura 36, analisando os tempos para cada sentido assim como qual a progressão de cada fase do semáforo.

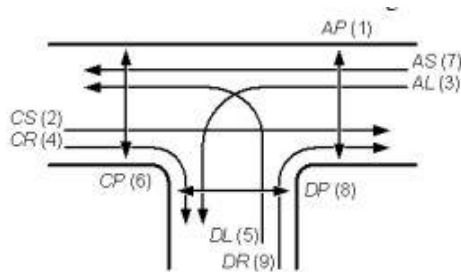


Figura 36 – Intersecção do tipo T [Antunović]

Estudou também o tráfego normal de um dia de semana, para ter dados iniciais para futuras comparações. Depois, foi desenvolvido um controlador difuso com 6 entradas, uma para cada sentido existente na intersecção, e cada um com 3 funções de pertinência que divide o trânsito em pouco, denso e intenso, e as saídas com funções de pertinência que representam a duração que o sinal verde está aceso. Os dados em tempo real são adquiridos por sensores que monitorizam o tráfego num dado instante, e enviam para o controlador difuso que por sua vez, decide quais as durações adequadas para cada sentido de forma a minimizar o tempo de espera de cada sentido.

Quanto aos resultados obtidos, o autor verificou que o desempenho desta alternativa diminuiu até 63% os tempos de espera num dia de tráfego normal.

4. MODELAÇÃO DO SISTEMA

Em todos os problemas de controlo, existe um sistema ao qual são aplicados diferentes ações de controlo. No caso do tema escolhido para este trabalho, o nosso sistema é a suspensão presente num automóvel.

Tal como foi apresentado anteriormente, no capítulo 2, existem diferentes tipos de suspensões que podem ser utilizadas: passivas, semi-ativas e totalmente ativas. Este capítulo pretende apresentar e explicar os modelos matemáticos que foram determinados e desenvolvidos para modelizar as suspensões automóveis, as quais irão constituir o nosso sistema a ser controlado.

4.1. TERMOS IMPORTANTES

Antes de apresentar os modelos, é necessário apresentar alguns conceitos importantes, que são tomados em conta quando é projetada uma suspensão e onde a má especificação dos seus parâmetros pode traduzir-se num modelo pobre e mais grave ainda, se implementado pode trazer falhas de segurança ao automóvel.

Os termos relevantes são [maesusp], [K.Craig]:

- **Massa suspensa (*Sprung mass*):** Representa todos os elementos que não se movem quando a suspensão sofre qualquer tipo de deslocamento (dado o chassi do automóvel como ponto de referência fixo). Alguns destes elementos são o próprio chassi, o motor do automóvel e os passageiros.
- **Massa não suspensa (*Unsprung mass*):** Ao contrário da massa suspensa, esta representa todos os elementos que se movem quando a suspensão sofre um deslocamento. De forma geral, são todos os elementos abaixo das molas, podendo incluir também as próprias molas. Alguns exemplos de elementos são as rodas e os amortecedores.
- ***Roll*:** Define o deslocamento angular da massa suspensa de um ponto de vista frontal. Representa de forma mais geral, qual a inclinação lateral do veículo a um dado instante, como mostra a Figura 37.



Figura 37 - *Roll* [maesusp]

- ***Pitch*:** Define o deslocamento angular da massa suspensa de um ponto de vista lateral, ou seja, qual a inclinação vertical do veículo se este for visto de uma perspectiva lateral, como apresentado na Figura 38.

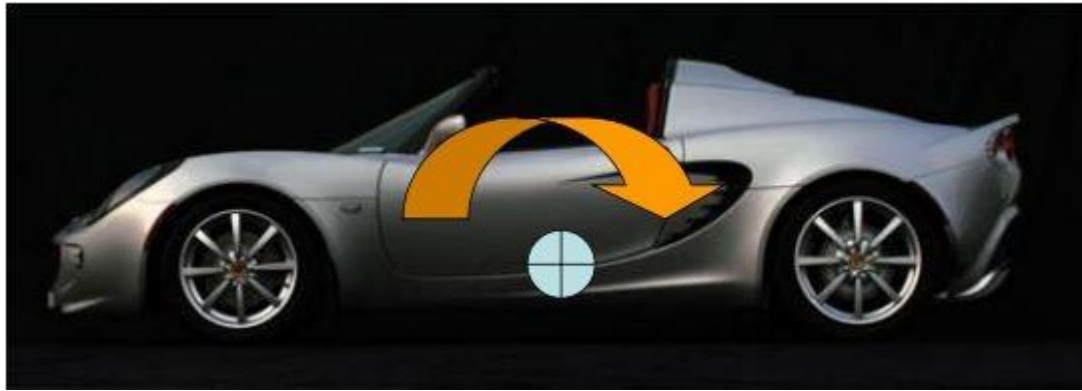


Figura 38 - *Pitch* [maesusp]

4.2. MODELOS DO SISTEMA DE SUSPENSÃO

Depois de explicados alguns dos termos relevantes para um mais fácil entendimento das representações adotadas para os modelos, serão agora apresentados os modelos para os diferentes tipos de suspensões passíveis de serem controlados, assim como todas as expressões que caracterizem as mesmas. Em diversos estudos, os modelos mais utilizados são, do mais simples para o mais complexo, o modelo de um quarto de carro com 2 graus de liberdade (*2 DOF Quarter-car*) que permite analisar as vibrações verticais; o modelo de meio carro com 4 graus de liberdade (*4 DOF Half-car*) que permite analisar as vibrações verticais tanto da frente como da traseira do veículo (duas entradas) assim como estudar o *pitch* e, por fim, o modelo de carro completo com 7 graus de liberdade (*7 DOF Full-car*) que permite analisar todas as deslocações de qualquer suspensão do veículo assim como o seu *pitch* e o *roll*.

Tendo em conta que o objetivo é conseguir controlar os parâmetros passíveis de serem controlados, as suspensões do tipo passivo não serão apresentadas, uma vez que os seus parâmetros fixos são definidos através dos próprios materiais e componentes.

4.2.1 Suspensões Semi-ativas

Nesta secção irão ser apresentados os modelos matemáticos relativos às suspensões semi-ativas, mais precisamente às que utilizam tecnologia MR nos seus amortecedores, visto que estas são as mais utilizadas nos estudos anteriormente referidos. Neste tipo de suspensão, são utilizados amortecedores com fluídos MR os quais permitem variar o coeficiente de amortecimento.

O modelo mais simples para este tipo de suspensões é o de um quarto de carro, e apresenta a seguinte forma, como ilustrada na Figura 39 [Rashid]:

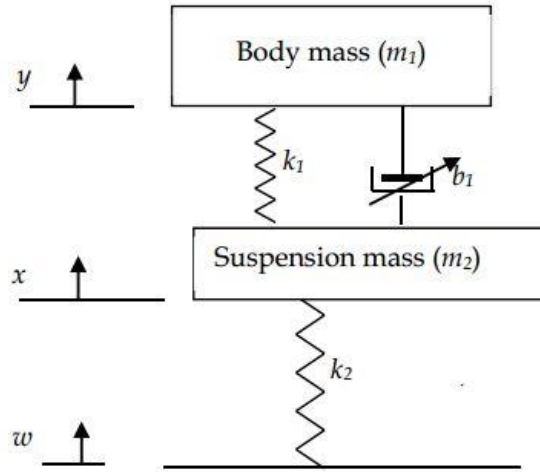


Figura 39 - Suspensão semi-ativa (*Quarter-car*) [Rashid]

Este modelo, sendo o mais simples, apenas apresenta 2 graus de liberdade o que permite analisar de cada vez as vibrações verticais da suspensão numa única roda. Este modelo como qualquer modelo de teoria de sistemas, possui os elementos base como as massas (m_1 e m_2), as molas (k_1 e k_2) e os amortecedores (b_1).

As equações (1) e (2) definem matematicamente o modelo de um quarto de carro:

$$m_1 \ddot{y} = -k_1(y - x) - b_1(\dot{y} - \dot{x}) \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x} = b_1(\dot{y} - \dot{x}) + k_1(y - x) - k_2(x - w) \quad (2)$$

onde b_1 é o amortecedor de coeficiente variável. Este tipo de modelo permite avaliar o comportamento de cada roda num determinado instante de tempo, o que pode ser um método moroso mas com alguns benefícios, como a análise detalhada de cada roda individualmente.

A Figura 40 mostra um modelo de meio carro com 4 graus de liberdade, onde é possível observar as diferenças face ao modelo de quarto de carro mais simples, uma vez que são analisadas em simultâneo as suspensões frontal e traseira [STŘÍBRSKÝ]:

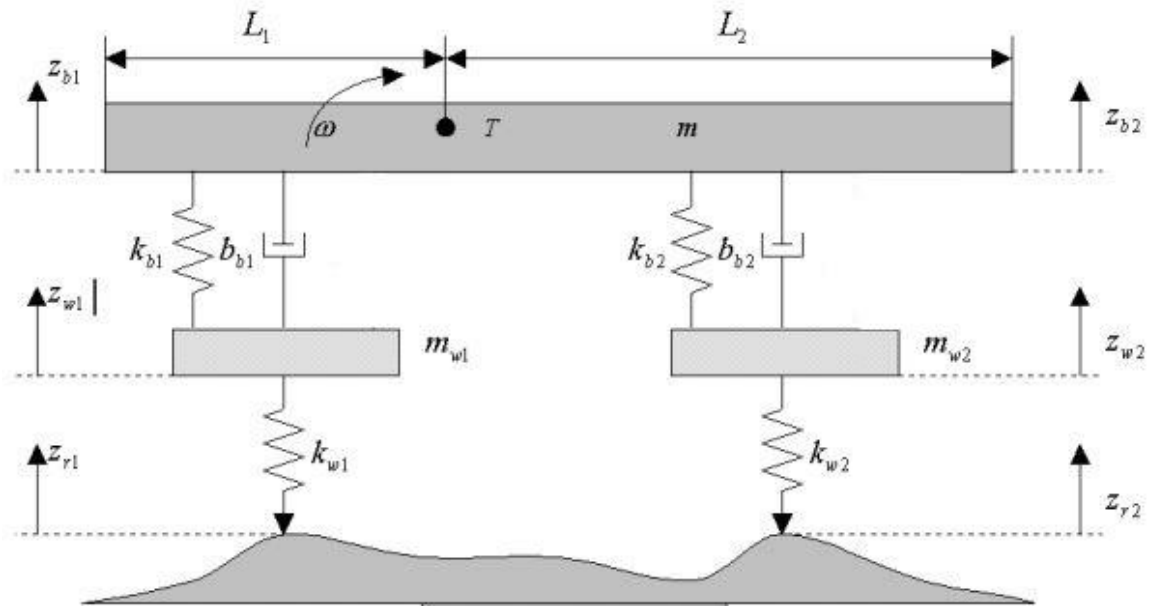


Figura 40 - Suspensão semi-ativa (*Half-car*)

As equações (3) - (6) definem o movimento das rodas frontais e traseiras [STŘÍBRSKÝ], assim como do corpo do veículo em cada um dos seus extremos.

$$m_{w1}\ddot{z}_{w1} = k_{b1}(z_{b1} - z_{w1}) - k_{w1}(z_{w1} - z_{r1}) + b_{b1}(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_{w1}) \quad (3)$$

$$m_{w2}\ddot{z}_{w2} = k_{b2}(z_{b2} - z_{w2}) - k_{w2}(z_{w2} - z_{r2}) + b_{b2}(\dot{z}_{b2} - \dot{z}_{w2}) \quad (4)$$

$$m.\ddot{z}_{b1} = -k_{b1}(z_{b1} - z_{w1}) - b_{b1}(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_{w1}) = F_1 \quad (5)$$

$$m.\ddot{z}_{b2} = -k_{b2}(z_{b2} - z_{w2}) - b_{b2}(\dot{z}_{b2} - \dot{z}_{w2}) = F_2 \quad (6)$$

A equação (7) representa o movimento oscilatório de *pitch* do corpo do veículo.

$$F_1 \cdot L_1 - F_2 \cdot L_2 - J_p \cdot \dot{\omega} = 0 \quad (7)$$

onde F_1 e F_2 são funções que visam simplificar a introdução das equações (5) e (6) na equação (7).

Neste modelo, à semelhança do anterior, também estão presentes os elementos base como as molas, os amortecedores variáveis e as massas. A principal diferença é que nestas últimas equações, é possível analisar o momento da inercia e o ângulo a que o veículo se encontra em relação ao piso.

Na Tabela 2 é possível observar quais os significados experimentais de cada uma das variáveis, para melhor compreensão do modelo apresentado.

Tabela 2 - Variáveis para o modelo de meio carro com suspensão semi-ativa

Variáveis	Definição	Unidades SI
m	<i>Sprung mass</i>	Kg
m_{w1}, m_{w2}	Massa das rodas traseira e dianteira	Kg
z_{w1}, z_{w2}	Deslocamento vertical da roda dianteira e da roda traseira	m
z_{b1}, z_{b2}	Deslocamentos verticais do corpo do veículo	m
w	Angulo de rotação do veículo no seu centro de gravidade	rad
J_p	Momento de inercia do corpo de veículo	Kg. m ²
L_1, L_2	Distância das rodas traseira e dianteira ao centro do veículo	m
k_{b1}, k_{b2}	Coeficiente de elasticidade das molas dianteira e traseira	N/m
b_{b1}, b_{b2}	Coeficiente de amortecimento dos amortecedores dianteiro e traseiro	Ns/m
k_{w1}, k_{w2}	Coeficiente de dureza dos pneus dianteiro e traseiro	N/m

O modelo mais completo é o modelo de carro completo o qual possui 7 graus de liberdade, permitindo analisar todos os movimentos verticais das quatro rodas em simultâneo, assim como o *pitch* e o *roll* do veículo. A Figura 41 apresenta um modelo de carro completo [Hamed].

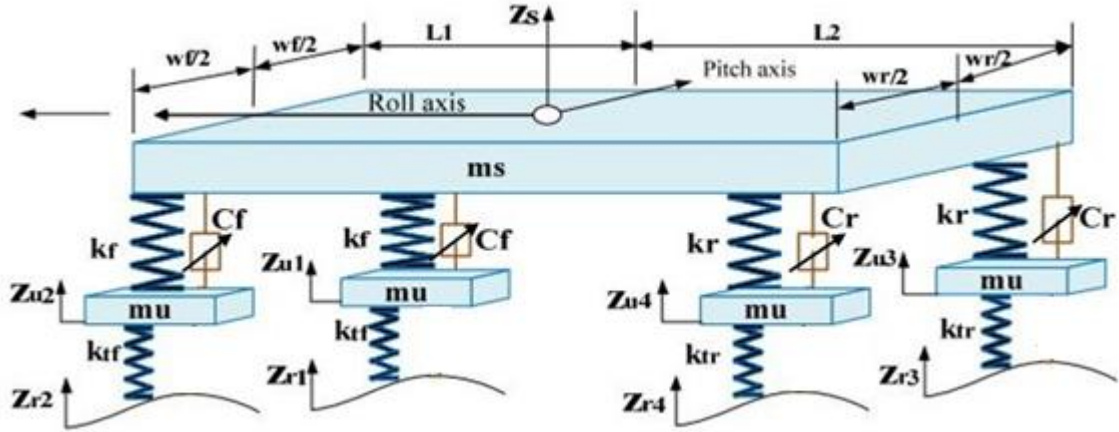


Figura 41 - Suspensão semi-ativa (*Full-car*) [Hamed]

A equação (8) representa os movimentos oscilatórios da massa suspensa (*sprung mass*), que em qualquer um dos casos é o que se pretende minimizar.

$$m_s \ddot{z}_s = k_f(z_{u1} - z_{s1}) + k_f(z_{u2} - z_{s2}) + k_r(z_{u3} - z_{s3}) + k_r(z_{u4} - z_{s4}) + c_f(\dot{z}_{u1} - \dot{z}_{s1}) + c_f(\dot{z}_{u2} - \dot{z}_{s2}) + c_r(\dot{z}_{u3} - \dot{z}_{s3}) + c_r(\dot{z}_{u4} - \dot{z}_{s4}) \quad (8)$$

Para definir o *pitch* e o *roll* do veículo são utilizadas as equações (9) e (10), respetivamente.

$$I_p \ddot{\theta} = k_f L_1(z_{u1} - z_{s1}) + k_f L_1(z_{u2} - z_{s2}) - k_r L_2(z_{u3} - z_{s3}) - k_r L_2(z_{u4} - z_{s4}) + c_f L_1(\dot{z}_{u1} - \dot{z}_{s1}) + c_f L_1(\dot{z}_{u2} - \dot{z}_{s2}) - c_r L_2(\dot{z}_{u3} - \dot{z}_{s3}) - c_r L_2(\dot{z}_{u4} - \dot{z}_{s4}) \quad (9)$$

$$I_r \ddot{\phi} = \frac{k_f w_f}{2}(z_{u1} - z_{s1}) - \frac{k_f w_f}{2}(z_{u2} - z_{s2}) + \frac{k_r w_r}{2}(z_{u3} - z_{s3}) - \frac{k_r w_r}{2}(z_{u4} - z_{s4}) + \frac{c_f w_f}{2}(\dot{z}_{u1} - \dot{z}_{s1}) - \frac{c_f w_f}{2}(\dot{z}_{u2} - \dot{z}_{s2}) + \frac{c_r w_r}{2}(\dot{z}_{u3} - \dot{z}_{s3}) - \frac{c_r w_r}{2}(\dot{z}_{u4} - \dot{z}_{s4}) \quad (10)$$

Por fim as equações (11) - (14) representam os movimentos verticais de cada uma das rodas e dos componentes que integram a massa não suspensa (*unsprung mass*).

$$m_{uf} \ddot{z}_{u1} = -k_f(z_{u1} - z_{s1}) - c_f(\dot{z}_{u1} - \dot{z}_{s1}) + k_{tf}(z_{r1} - z_{u1}) \quad (11)$$

$$m_{uf}\ddot{z}_{u2} = -k_f(z_{u2} - z_{s2}) - c_f(\dot{z}_{u2} - \dot{z}_{s2}) + k_{tf}(z_{r2} - z_{u2}) \quad (12)$$

$$m_{ur}\ddot{z}_{u3} = -k_r(z_{u3} - z_{s3}) - c_r(\dot{z}_{u3} - \dot{z}_{s3}) + k_{tr}(z_{r3} - z_{u3}) \quad (13)$$

$$m_{ur}\ddot{z}_{u4} = -k_r(z_{u4} - z_{s4}) - c_r(\dot{z}_{u4} - \dot{z}_{s4}) + k_{tr}(z_{r4} - z_{u4}) \quad (14)$$

A Tabela 3 apresenta as definições de cada variável utilizada para descrever o modelo de carro completo apresentado.

Tabela 3 - Variáveis para o modelo de carro completo com suspensão semi-ativa

Variáveis	Definição	Unidades SI
m_s	<i>Sprung mass</i>	Kg
m_{uf}, m_{ur}	<i>Unsprung Mass</i> dianteira e traseira	Kg
I_p, I_r	Momento de inercia do <i>Pitch</i> e do <i>Roll</i>	Kg. m ²
L_1, L_2	Distância das rodas dianteiras e traseiras ao centro do veículo	m
k_f, k_r	Coefficiente de elasticidade das molas dianteiras e traseiras	N/m
k_{tf}, k_{tr}	Coefficiente de dureza dos pneus dianteiros e traseiros	N/m
c_f, c_r	Coefficiente de amortecimento dos amortecedores dianteiros e traseiros	Ns/m
w_f, w_r	Largura frontal e traseira do veículo	m
z_s	Deslocamento vertical do corpo do veículo	m
$z_{u1}, z_{u2}, z_{u3}, z_{u4}$	Deslocamento vertical de cada roda	m
θ, φ	Ângulos de <i>roll</i> e <i>pitch</i>	rad

4.2.2 Suspensões totalmente ativas

Depois de abordados os modelos desenvolvidos por diversos autores para as suspensões semi-ativas, passa-se agora a apresentar os modelos respetivos para as suspensões totalmente ativas. De notar, que em termos de estrutura os modelos são algo semelhantes uma vez que

existem as mesmas variantes (*Quarter*, *Half* e *Full*). No entanto, diferem uns dos outros já que o princípio de funcionamento das suspensões totalmente ativas é diferente.

Como referidas, as suspensões utilizam motores para regular a altura e a dureza e os restantes parâmetros das suspensões de cada roda individualmente, de forma a garantir o melhor desempenho para todas as situações. Com isto, o primeiro modelo a apresentar é o de quarto de carro por ser o mais simples, Figura 42 [Rashid].

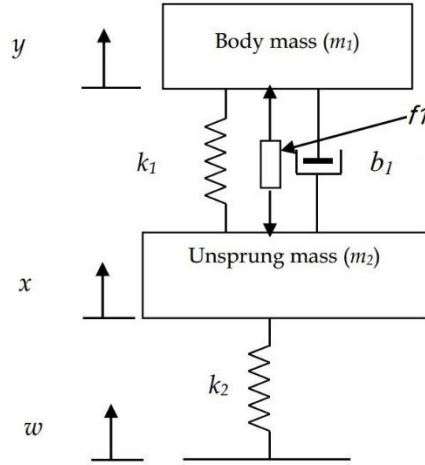


Figura 42 - Suspensão totalmente ativa (*Quarter-car*) [Rashid]

As equações que descrevem as deslocações verticais para o modelo apresentado são:

$$m_1 \ddot{y} = -b_1(\dot{y} - \dot{x}) - k_1(y - x) + f_1 \quad (15)$$

$$m_2 \ddot{x} = b_1(\dot{y} - \dot{x}) + k_1(y - x) - k_2(x - w) - f_1 \quad (16)$$

onde f_1 é a força aplicada pelo motor à massa M_1 ou *unsprung mass*, de forma a contrariar o impacto que as irregularidades do piso exercem sobre o sistema de suspensão do veículo.

O modelo de 4 graus de liberdade de meio carro, proposto por alguns autores, para a análise de suspensões ativas pode ser verificado através da Figura 43 [Vaughan].

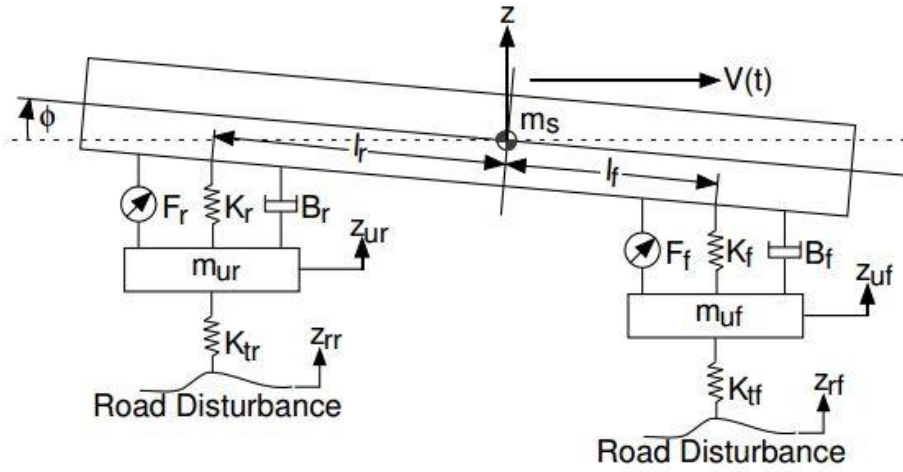


Figura 43 - Suspensão totalmente ativa (*Half-car*) [Vaughan]

Para poder descrever os movimentos verticais da massa não suspensa utiliza-se a seguinte equação (17):

$$\ddot{z} = -\frac{B_f + B_r}{m_s} \dot{z} + \frac{l_f B_f + l_r B_r}{m_s} \dot{\phi} - \frac{K_f}{m_s} (z_{sf} - z_{uf}) + \frac{B_f}{m_s} \dot{z}_{uf} - \frac{K_r}{m_s} (z_{sr} - z_{ur}) + \frac{B_r}{m_s} \dot{z}_{ur} - g + \frac{F_f}{m_s} + \frac{F_r}{m_s} \quad (17)$$

A equação (18) serve para analisar a inclinação, ou seja, o *pitch* do veículo, através da análise de ambas as suspensões.

$$\ddot{\phi} = -\frac{l_f B_f + l_r B_r}{I} \dot{z} - \frac{l_f^2 B_f + l_r^2 B_r}{I} \dot{\phi} + \frac{l_f K_f}{I} (z_{sf} - z_{uf}) - \frac{l_f B_f}{I} \dot{z}_{uf} - \frac{l_r K_r}{I} (z_{sr} - z_{ur}) + \frac{l_r B_r}{I} \dot{z}_{ur} - \frac{l_f F_f}{I} + \frac{l_r F_r}{I} \quad (18)$$

As equações (19) e (20) descrevem os restantes movimentos verticais das massas não suspensas, quer frontal quer traseira.

$$\begin{aligned}
\ddot{z}_{uf} = & -\frac{K_{tf}}{m_{uf}}z + \frac{B_f}{m_{uf}}\dot{z} + \frac{l_f K_{tf}}{m_{uf}}\phi - \frac{l_f B_f}{m_{uf}}\dot{\phi} \\
& + \frac{K_f + K_{tf}}{m_{uf}}(z_{sf} - z_{uf}) - \frac{B_f}{m_{uf}}\dot{z}_{uf} - g \\
& + \frac{K_{tf}}{m_{uf}}z_{rf} - \frac{F_f}{m_{uf}}
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
\ddot{z}_{ur} = & -\frac{K_{tr}}{m_{ur}}z + \frac{B_r}{m_{ur}}\dot{z} - \frac{l_r K_{tr}}{m_{ur}}\phi + \frac{l_r B_r}{m_{ur}}\dot{\phi} \\
& + \frac{K_r + K_{tr}}{m_{ur}}(z_{sr} - z_{ur}) - \frac{B_r}{m_{ur}}\dot{z}_{ur} - g + \frac{K_{tr}}{m_{ur}}z_{rr} \\
& - \frac{F_r}{m_{ur}}
\end{aligned} \tag{20}$$

Para se compreender quais os significados das diversas variáveis, e à semelhança dos modelos apresentados anteriormente, é apresentada a Tabela 4 a qual contém os significados das diferentes variáveis presentes nas equações (17) (18) (19) e (20).

Tabela 4 - Variáveis para o modelo de meio carro com suspensão totalmente ativa

Variáveis	Definição	Unidades SI
K_f, K_r	Coeficiente das molas dianteira e traseira	N/m
B_f, B_r	Coeficiente dos amortecedores dianteiro e traseiro	Ns/m
K_{tf}, K_{tr}	Molas dos pneus dianteiro e traseiro	N/m
F_f, F_r	Atuadores dianteiro e traseiro	N
M_s	<i>Sprung mass</i>	Kg
I	Momento de inercia da massa suspensa no angulo do <i>pitch</i>	Kg.m ²
m_{uf}, m_{ur}	<i>Unsprung mass</i> dianteira e traseira	Kg
l_f, l_r	Distância das suspensões dianteira e traseira (desde o centro de massa)	m
z	Deslocamento vertical da massa suspensa	m
ϕ	Ângulo do <i>pitch</i>	rad
z_{sf}, z_{sr}	Deslocamento vertical da massa suspensa no ponto de união das suspensões dianteira e traseira	m
z_{uf}, z_{ur}	Deslocamento vertical da massa não-suspensa dianteira e traseira	m
z_{rf}, z_{rr}	Deslocamento vertical da estrada nos eixos dianteiro e traseiro	m

Para completar a lista de modelos propostos para a análise de suspensões totalmente ativas, é apresentado o modelo de 7 graus de liberdade de carro completo, como mostra a Figura 44 [Darus].

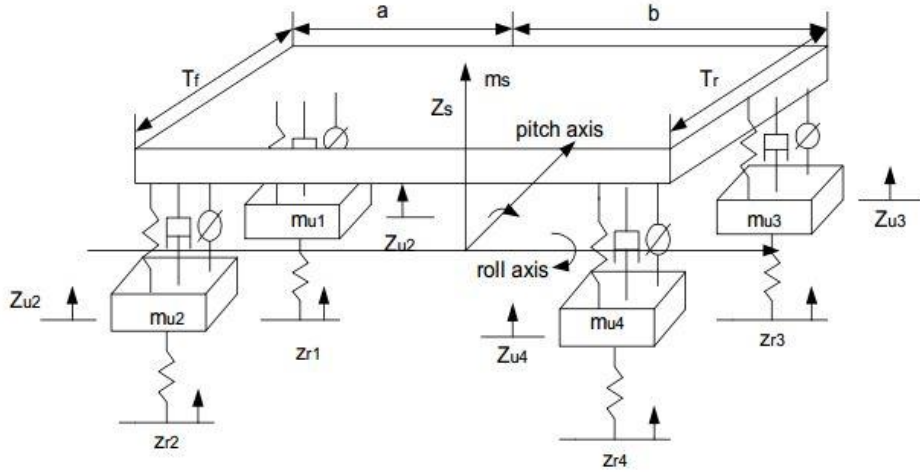


Figura 44 - Suspensão totalmente ativa (*Full-car*) [Darus]

Este modelo dinâmico pode ser dividido em partes distintas, facilitando assim a sua análise. A primeira é representada pela equação (21) que apresenta os movimentos da massa suspensão do veículo.

$$m_s \ddot{Z}_s = -b_f(\dot{Z}_{s1} - \dot{Z}_{u1}) - b_f(\dot{Z}_{s2} - \dot{Z}_{u2}) - b_r(\dot{Z}_{s3} - \dot{Z}_{u3}) - b_r(\dot{Z}_{s4} - \dot{Z}_{u4}) - k_f(Z_{s1} - Z_{u1}) - k_f(Z_{s2} - Z_{u2}) - k_r(Z_{s3} - Z_{u3}) - k_r(Z_{s4} - Z_{u4}) + u_1 + u_2 + u_3 + u_4 \quad (21)$$

Para descrever os movimentos oscilatórios de *pitch* e *roll* utilizam-se as equações (22) e (23).

$$I_p \ddot{\theta}_s = -b_f a(\dot{Z}_{s1} - \dot{Z}_{u1}) - b_f a(\dot{Z}_{s2} - \dot{Z}_{u2}) - b_r b(\dot{Z}_{s3} - \dot{Z}_{u3}) + b_r b(\dot{Z}_{s4} - \dot{Z}_{u4}) - k_f a(Z_{s1} - Z_{u1}) + k_f a(Z_{s2} - Z_{u2}) + k_r b(Z_{s3} - Z_{u3}) + k_r b(Z_{s4} - Z_{u4}) + a u_1 + a u_2 - b u_3 - b u_4 \quad (22)$$

$$I_r \ddot{\phi}_s = -b_f T_f(\dot{Z}_{s1} - \dot{Z}_{u1}) - b_f T_f(\dot{Z}_{s2} - \dot{Z}_{u2}) - b_r T_r(\dot{Z}_{s3} - \dot{Z}_{u3}) + b_r T_r(\dot{Z}_{s4} - \dot{Z}_{u4}) - k_f T_f(Z_{s1} - Z_{u1}) + k_f T_f(Z_{s2} - Z_{u2}) - k_r T_r(Z_{s3} - Z_{u3}) + k_r T_r(Z_{s4} - Z_{u4}) + T_f u_1 - T_f u_2 + T_r u_3 - T_r u_4 \quad (23)$$

A última parte importante para descrever o modelo é descrita pelas equações (24) - (27) que representam os movimentos verticais de cada roda.

$$m_{uf}\ddot{Z}_{u1} = b_f(\dot{Z}_{s1} - \dot{Z}_{u1}) + k_f(Z_{s1} - Z_{u1}) - k_{tf}Z_{u1} - u_1 + k_{tf}Z_{r1} \quad (24)$$

$$m_{uf}\ddot{Z}_{u2} = b_f(\dot{Z}_{s2} - \dot{Z}_{u2}) + k_f(Z_{s2} - Z_{u2}) - k_{tf}Z_{u2} - u_2 + k_{tf}Z_{r2} \quad (25)$$

$$m_{ur}\ddot{Z}_{u3} = b_r(\dot{Z}_{s3} - \dot{Z}_{u3}) + k_r(Z_{s3} - Z_{u3}) - k_{tr}Z_{u3} - u_3 + k_{tr}Z_{r3} \quad (26)$$

$$m_{ur}\ddot{Z}_{u4} = b_r(\dot{Z}_{s4} - \dot{Z}_{u4}) + k_r(Z_{s4} - Z_{u4}) - k_{tr}Z_{u4} - u_4 + k_{tr}Z_{r4} \quad (27)$$

onde:

$$\begin{aligned} Z_{s1} &= T_f\phi_s + a\theta_s + Z_s \\ \dot{Z}_{s1} &= T_f\dot{\phi}_s + a\dot{\theta}_s + \dot{Z}_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{s2} &= -T_f\phi_s + a\theta_s + Z_s \\ \dot{Z}_{s2} &= -T_f\dot{\phi}_s + a\dot{\theta}_s + \dot{Z}_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{s3} &= -T_r\phi_s + b\theta_s + Z_s \\ \dot{Z}_{s3} &= -T_r\dot{\phi}_s + b\dot{\theta}_s + \dot{Z}_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{s4} &= -T_r\phi_s + b\theta_s + Z_s \\ \dot{Z}_{s4} &= -T_r\dot{\phi}_s + b\dot{\theta}_s + \dot{Z}_s \end{aligned}$$

A Tabela 5 explicita as variáveis utilizadas para descrever o modelo de carro completo assim como as suas unidades, de forma a tornar mais claro qual o seu significado no contexto do modelo.

Tabela 5 - Variáveis para o modelo de carro completo com suspensão totalmente ativa

Variáveis	Definição	Unidades SI
Z_s	Deslocamento vertical da massa suspensa	m
Z_{u1}, Z_{u2}	Deslocamento vertical das rodas frontal direita e esquerda	m
Z_{u3}, Z_{u4}	Deslocamento vertical das rodas traseiras direita e esquerda	m
θ_s	Ângulo do <i>pitch</i>	rad
φ_s	Ângulo do <i>roll</i>	rad
m_s	Massa do veículo (massa suspensa)	Kg
m_{uf}, m_{ur}	Massa não-suspensa dianteira e traseira	Kg
I_p, I_r	Momento de inercia do <i>pitch</i> e do <i>roll</i>	Kg.m ²
k_f, k_r	Coeficiente das molas dianteira e traseira	N/m
k_{tf}, k_{tr}	Coeficiente de dureza dos pneus dianteiro e traseiro	N/m
b_f, b_r	Coeficiente de amortecimento dianteiro e traseiro	N/m
a, b	Distancia das rodas frontais e traseira ate ao centro de gravidade	m
T_f, T_r	Largura da frente e traseira do veículo	m

5. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

De forma a tentar alcançar os objetivos propostos para este trabalho, e depois de serem estudados os diversos modelos matemáticos que permitem a análise dos diferentes movimentos existentes numa suspensão automóvel, é possível agora utilizar esses modelos matemáticos para desenvolver modelos computacionais onde se podem simular diversas condições de pisos e diversos veículos, bem como os efeitos dos controladores que lhes serão aplicados.

Neste capítulo irão ser apresentados todos os modelos desenvolvidos para os diferentes tipos de suspensões estudadas (semi-ativas e totalmente ativas), os quais terão por base os modelos matemáticos apresentados no capítulo anterior, e aos quais lhes serão aplicados os controladores de lógica difusos que irão produzir a dinâmica característica das suspensões ativas.

5.1. MODELOS DESENVOLVIDOS

Nesta subsecção são apresentadas as implementações realizadas no *Simulink* para os modelos desenvolvidos, os quais servirão como base para o estudo proposto, assim como os controladores de lógica difusa programados para cada um dos casos de estudo.

5.1.1 Suspensões passivas

O modelo de suspensão passiva, não sendo o nosso objeto de estudo, pois não é controlável, é necessário por diversos motivos. O primeiro é para servir como base de comparação com os dados que surgem das simulações das diferentes suspensões controladas, e em segundo lugar para se visualizar quais os limites de cada variável que fazem parte do controlador difuso.

Desta forma, foram desenvolvidos diferentes modelos para a suspensão passiva, a saber, para um quarto de carro, meio carro e para um carro completo. A Figura 45 mostra o modelo passivo para um quarto de carro.

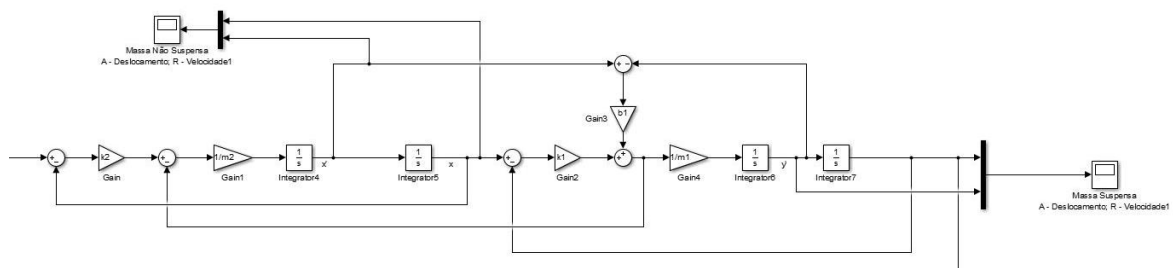


Figura 45 – Modelo de suspensão passiva para um quarto de carro

Para o modelo de meio carro, o modelo desenvolvido é o apresentado na Figura 46.

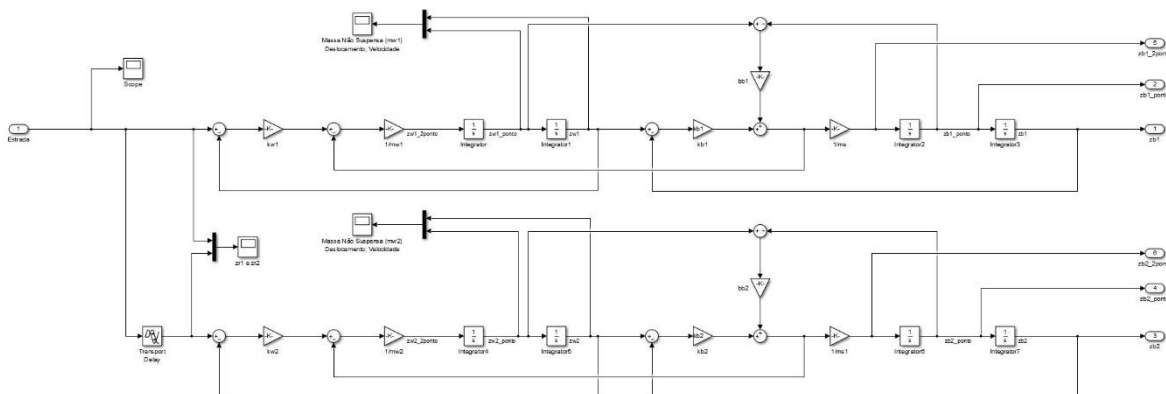


Figura 46 – Modelo de suspensão passiva para meio carro

Por fim, o modelo de suspensão passiva para um carro completo. Este modelo é apresentado na Figura 47.

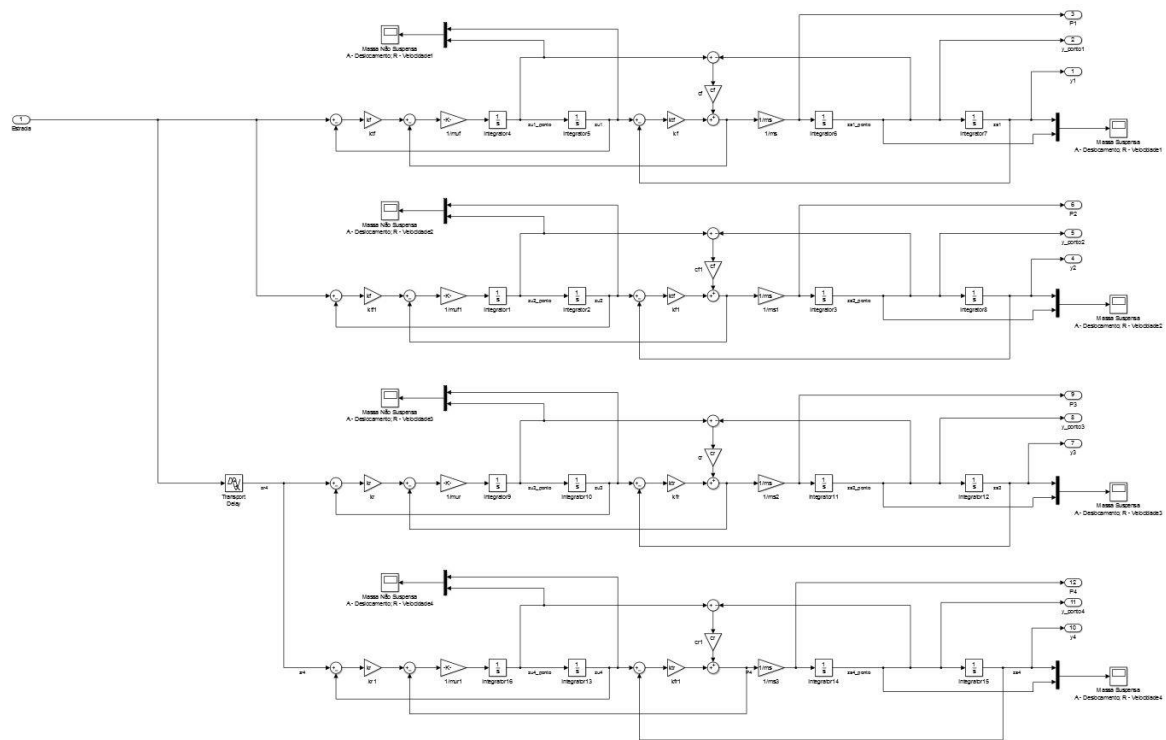


Figura 47 - Modelo de suspensão passiva para um carro completo

5.1.2 Suspensões semi-ativas

Da mesma forma como foram introduzidos os modelos matemáticos, os modelos desenvolvidos para os diferentes tipos de suspensões irão ser divididos entre semi-ativas e totalmente ativas. E dentro de cada tipo de suspensões irão ser especificados os diferentes modelos para um quarto de carro, meio carro e para um carro completo.

5.1.2.1 Quarto de carro

O primeiro modelo desenvolvido foi para um quarto de carro, que é o mais simples quando comparado aos de meio carro e carro completo. Este modelo também serviu como base para os desenvolvidos posteriormente, uma vez que a diferença para os modelos seguintes não é significativa. A Figura 48 mostra o modelo desenvolvido para este tipo de estudo.

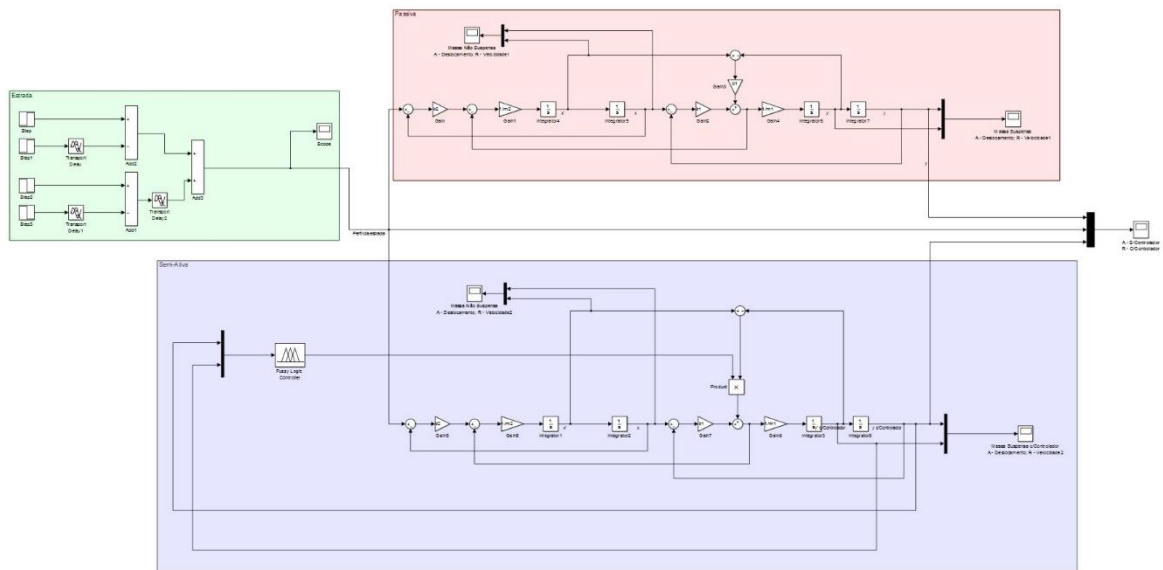


Figura 48 – Modelo de suspensão semi-ativa para um quarto de carro

Neste modelo a área marcada a vermelho representa a suspensão passiva, a área a azul representa a suspensão semi-ativa controlada por lógica difusa e a área a verde representa o perfil de estrada pretendido para a simulação.

O perfil da estrada utilizado é constante durante os estudos iniciais, os quais servirão para validar o funcionamento do controlador implementado. Este é composto por um conjunto de blocos que permitem combinar diferentes sinais em degrau de forma a se obter o piso pretendido. Esse perfil consiste numa lomba de 10 cm seguida de um buraco de 10 cm, ou seja, uma elevação e uma depressão. A Figura 49 mostra qual o aspeto do perfil da estrada dentro do ambiente de programação.

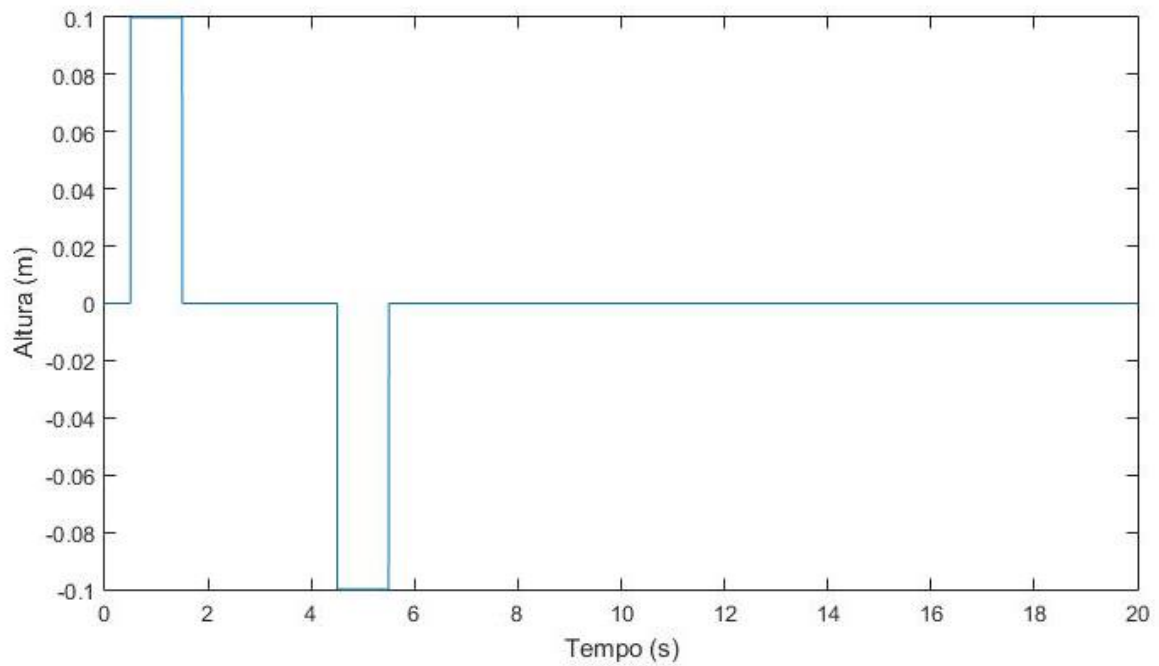


Figura 49 - Perfil da estrada

As variáveis que são analisadas em todos os modelos e que servem como base para o controlador difuso são:

- o deslocamento vertical da massa suspensa em relação à sua posição de repouso, ou a deflexão da massa suspensa. É este deslocamento que é pretendido minimizar.
- a velocidade vertical da massa suspensa.

Estas variáveis existem em diferentes quantidades dependendo do modelo em análise, no quarto de carro só existe um deslocamento e uma velocidade, uma vez que só se estuda uma roda.

Assim, a suspensão semi-ativa é controlada recorrendo ao uso da lógica difusa, a qual irá ser responsável por controlar o coeficiente de amortecimento a aplicar nos amortecedores, de forma a otimizar o seu funcionamento. O controlador difuso foi programado com recurso à biblioteca (*toolbox*) existente no *Matlab*, e que toma o seguinte aspeto:

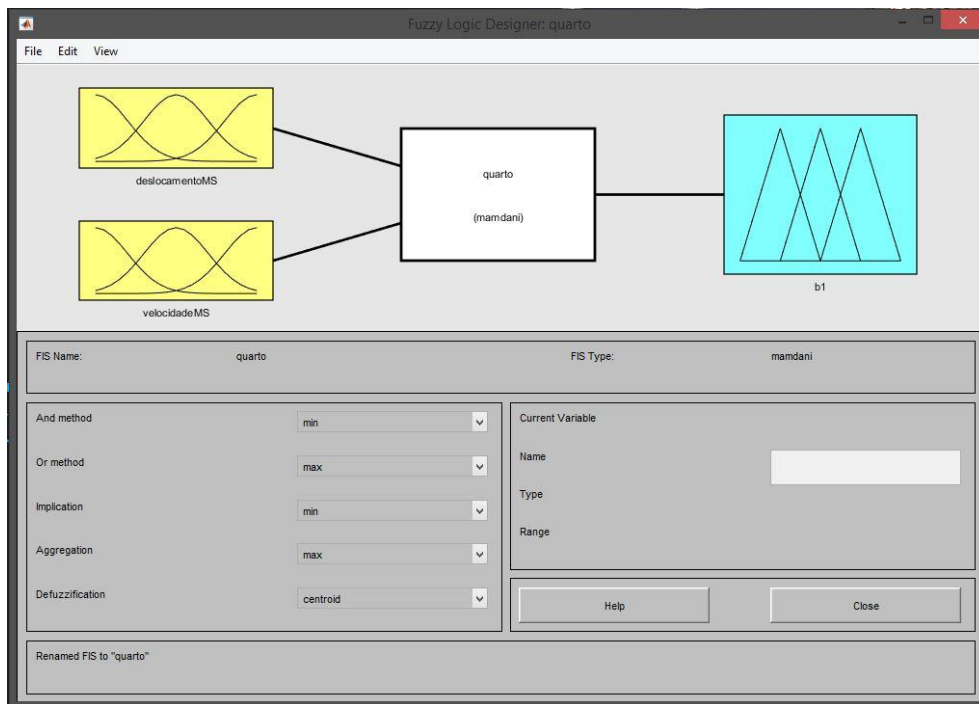


Figura 50 – Controlador difuso semi-ativo para um quarto de carro

A Figura 50 mostra a constituição do controlador difuso desenvolvido para este sistema. Este é composto por duas entradas, a saber, o deslocamento e a velocidade vertical da massa suspensa, e uma saída, a qual corresponde ao valor do coeficiente de amortecimento do amortecedor. Cada entrada e saída tem uma gama de valores que pode assumir, assim como as suas respetivas funções de pertença, importantes para depois se definir as várias regras características dos sistemas de lógica difusa. As funções de pertença de cada variável podem ser observadas nas figuras 51, 52 e 53.

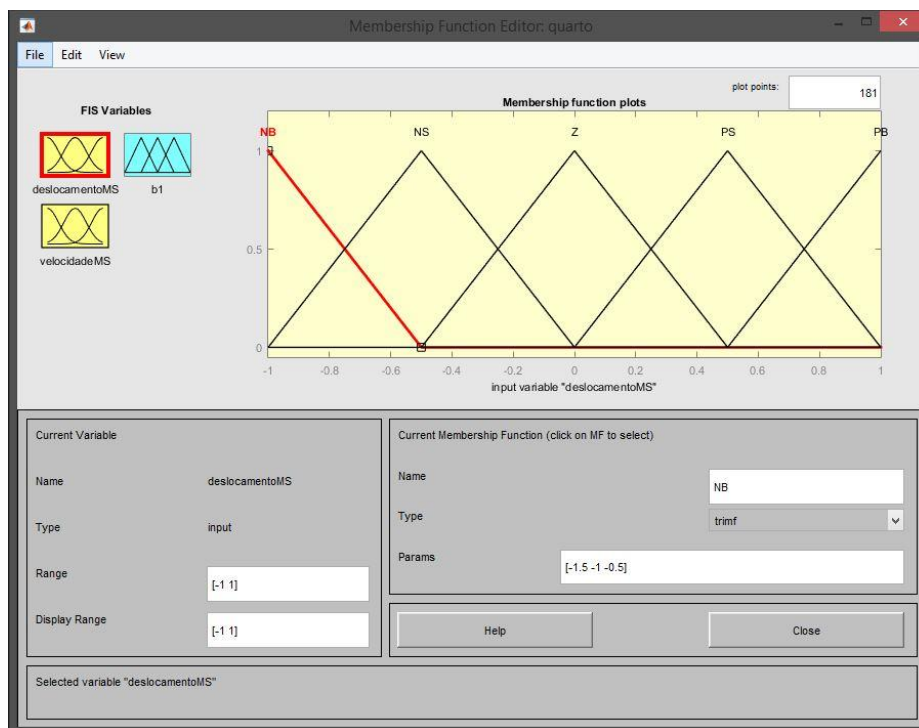


Figura 51 – Variável de entrada - deslocamento para um quarto de carro

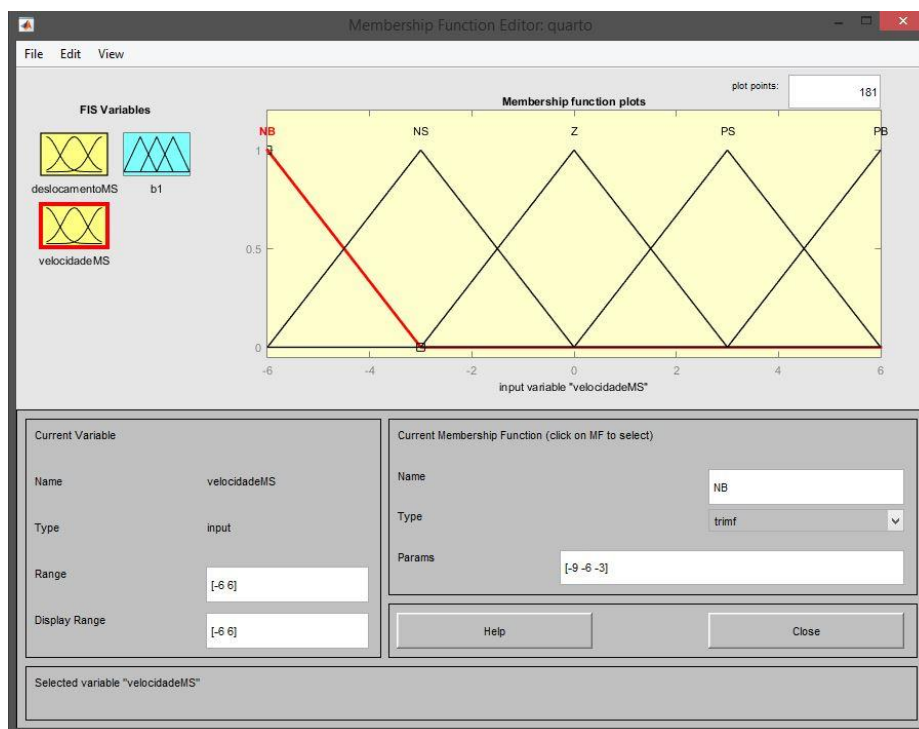


Figura 52 – Variável de entrada - velocidade para um quarto de carro

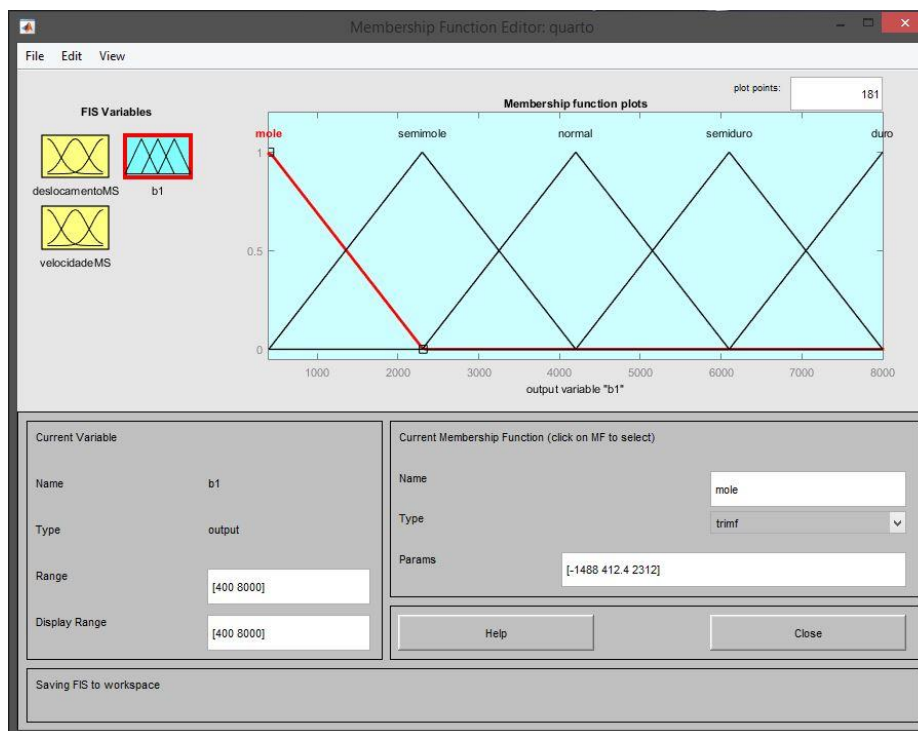


Figura 53 – Variável de saída - coeficiente de amortecimento para um quarto de carro

Para o controlador foram utilizados cinco termos linguísticos, o que equivale a ter cinco funções de pertença por cada variável. Isto permite ao controlador estar numa situação intermedia, onde este é mais refinado que um controlador que possui três termos linguísticos, e mais simples de sintonizar do que um controlador de sete termos linguísticos. Foram utilizadas funções de pertença do tipo triangular uma vez que, estas são as que apresentam melhores resultados para este tipo de sistemas, e são mais simples de alterar caso seja preciso fazer alguma sintonia mais fina do controlador.

Para fazer a ligação entre as variáveis de entrada e as de saída foi escrito um conjunto de regras difusas. Este conjunto de regras interliga por meio de conectores “AND” as duas entradas (Δd e Δv) e dessa intersecção resulta uma gama de valores da saída. A variável de entrada Δd representa a deflexão que a roda sofre e Δv a velocidade com que esta mesma ocorre, e este conceito é valido durante todo o estudo. Estas regras podem ser visualizadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Matriz de regras difusas para um quarto de carro

$\Delta d \backslash \Delta v$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	M	M	SM	SM	N
NS	M	SM	SM	SM	SD
Z	SM	SM	N	SD	SD
PS	SM	N	SD	SD	D
PB	N	SD	SD	D	D

onde:

NB – *Negative Big*

M - Mole

NS – *Negative Small*

N - Normal

Z – Zero

D - Duro

PS – *Positive Small*

SM – Semi Mole

PB – *Positive Big*

SD – Semi Duro

5.1.2.2 Meio carro

Passando para o modelo de meio carro, este é composto por uma roda frontal e outra traseira, como já foi referido no capítulo anterior. Este modelo apresenta algumas semelhanças quando comparado com o modelo de quarto de carro, como é possível observar na Figura 54.

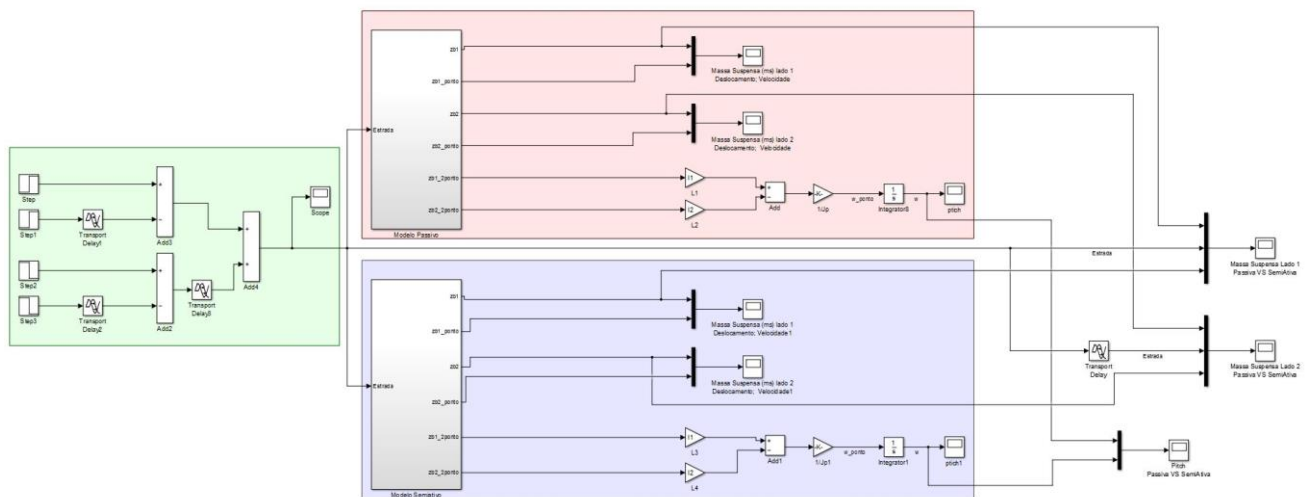


Figura 54 - Modelo de suspensão semi-ativa para meio carro

À semelhança do modelo de quarto de carro, foram sombreadas as diferentes secções do modelo com áreas coloridas. Dentro das áreas correspondentes às suspensões passiva e semi-ativa, existem dois blocos de dimensões mais elevadas, os quais correspondem a subsistemas que representam as suspensões passiva na área vermelha, e a semi-ativa na área azul. Os subsistemas foram criados com o intuito de sintetizar o modelo, tornando-o mais simples de compreender. A Figura 55 apresenta o conteúdo do subsistema semi-ativo.

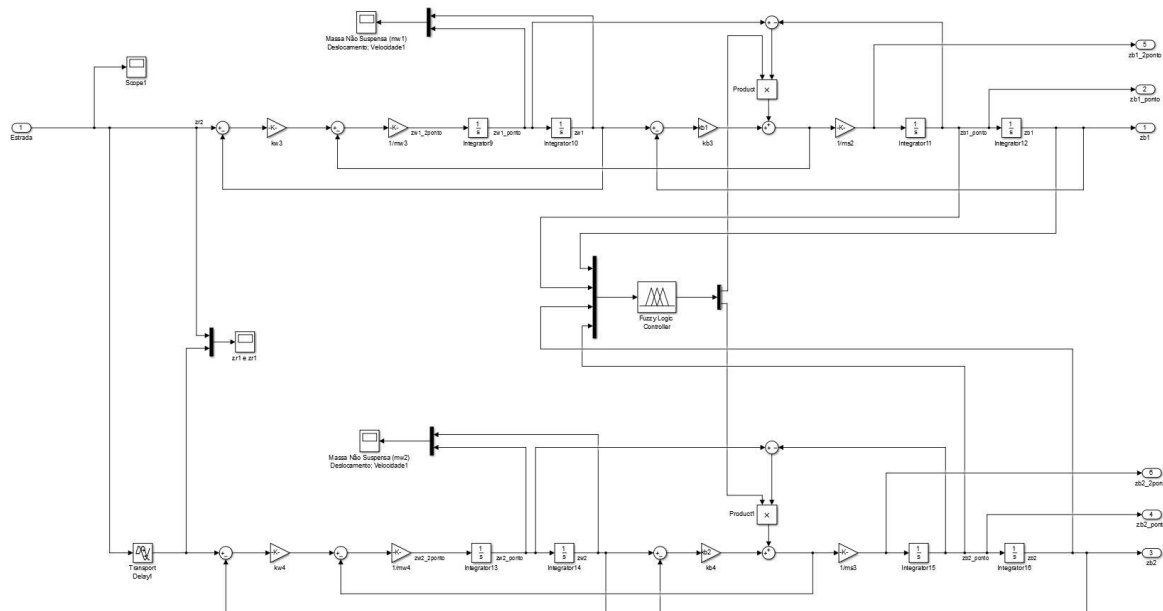


Figura 55 – Suspensão semi-ativa para meio carro

Em ambos os modelos que compõem os subsistemas, é possível observar a existência de dois “ramos” que são semelhantes, no entanto possuem a diferença de um bloco de atraso. Este bloco de atraso é colocado num dos “ramos” para simular a passagem das rodas em momentos de tempo diferentes e assim produzir o efeito das rodas dianteira e traseira.

Para controlar todo este novo sistema de suspensão semi-ativa foi desenvolvido um novo controlador difuso. Este novo controlador possui um par de entradas para cada roda, ou seja, sendo as entradas do controlador o deslocamento e a velocidade da massa suspensa de uma roda, e tratando-se de um modelo de meio carro, iremos ter deslocamento e velocidade em duas rodas em simultâneo. Na saída do controlador iremos ter dois valores para o coeficiente de amortecimento, correspondendo o primeiro à roda dianteira e o segundo à roda traseira. A estrutura do controlador é apresentada na Figura 56.

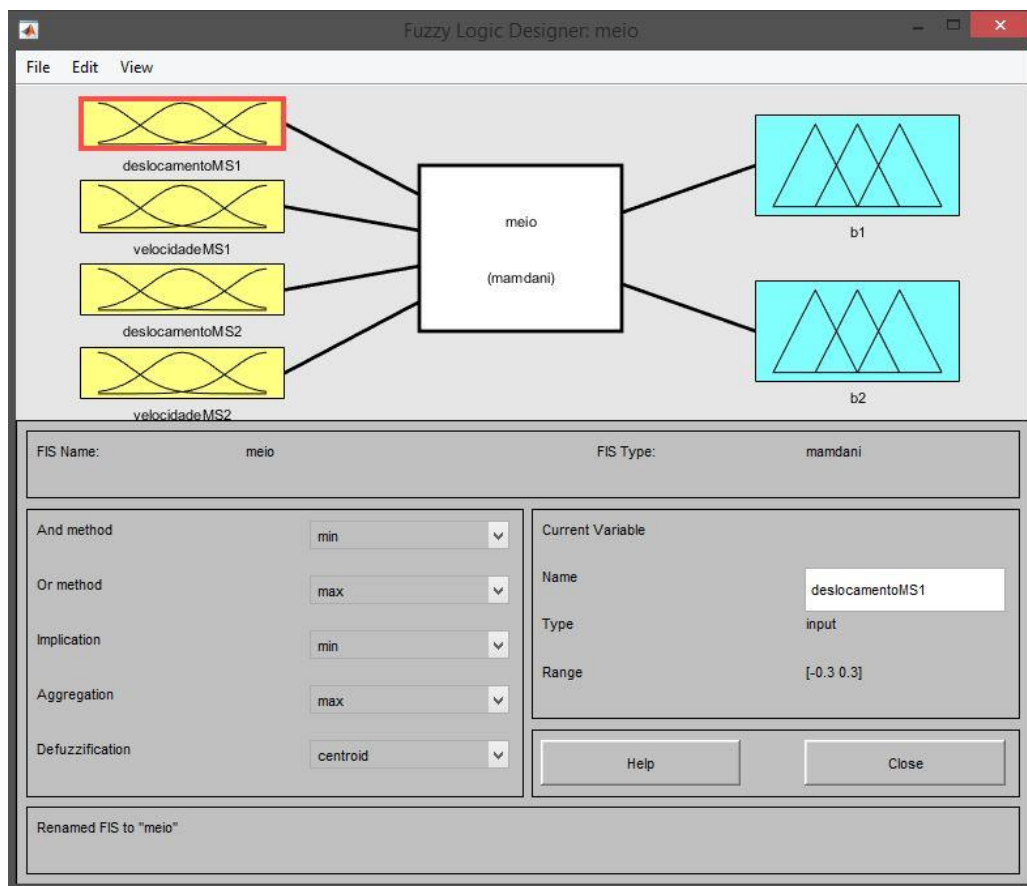


Figura 56 – Controlador difuso semi-ativo para meio carro

As funções de pertinência e termos linguísticos utilizados para este novo controlador são iguais aos utilizados durante o desenvolvimento do controlador para o modelo de quarto de carro.

Existindo 4 variáveis de entrada e 2 de saída, cada uma delas tem que ser caracterizada pelas suas funções de pertença. Uma vez que existem diferenças mínimas entre as duas rodas representadas no modelo, as funções de pertença são definidas da mesma forma para as rodas frontais e traseiras. As figuras 57, 58 e 59 mostram as funções de pertença definidas para a roda frontal.

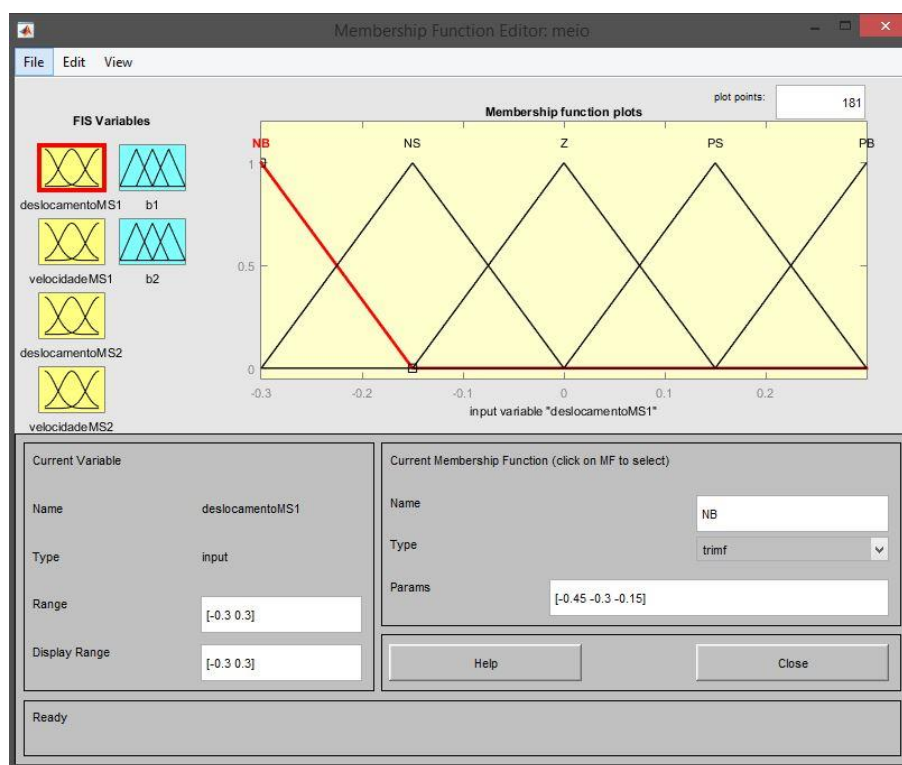


Figura 57 – Variável de entrada - deslocamento para a roda frontal de meio carro

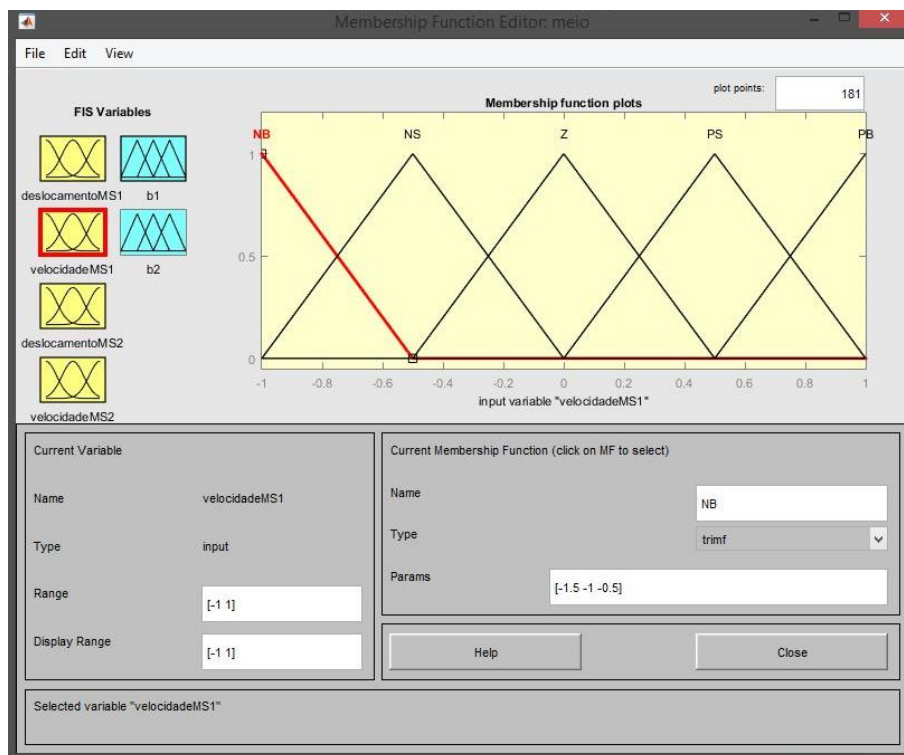


Figura 58 – Variável de entrada - velocidade para a roda frontal de meio carro

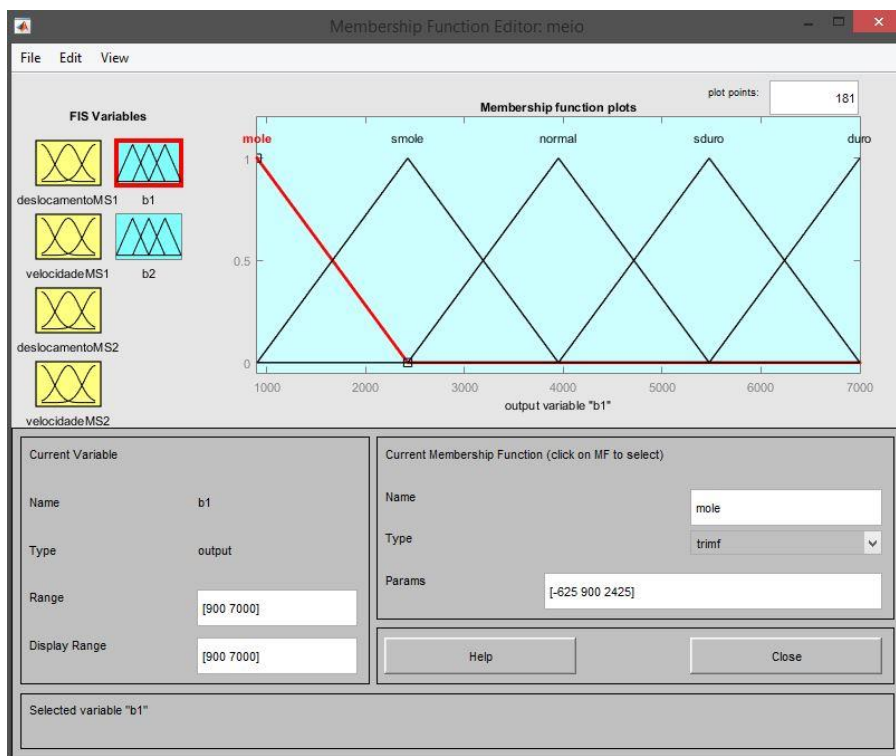


Figura 59 – Variável de saída - coeficiente de amortecimento para a roda frontal de meio carro

A existência de mais variáveis implica um aumento nas regras necessárias para o bom funcionamento do controlador difuso. Enquanto que no modelo anterior existia um total de 25 regras (Tabela 6), para este modelo há a necessidade de 50 regras, das quais 25 são para a roda frontal e 25 para a roda traseira. A Tabela 7 apresenta uma matriz de um conjunto de 25 regras que são utilizadas tanto para a roda frontal, como para a roda traseira.

Tabela 7 – Matriz de regras difusas para meio carro

$\Delta d \backslash \Delta v$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	M	M	SM	SM	N
NS	M	SM	SM	SM	SD
Z	SM	SM	N	SD	SD
PS	SM	N	SD	SD	D
PB	N	SD	SD	D	D

5.1.2.3 Carro completo

O último modelo desenvolvido para o estudo das suspensões semi-ativas é o do carro completo. Este modelo permite analisar todas as rodas do carro em simultâneo e também, estudar dados importantes como as inclinações que a massa suspensa sofre quando as rodas passam por irregularidades na estrada. A Figura 60 apresenta o modelo de carro completo desenvolvido.

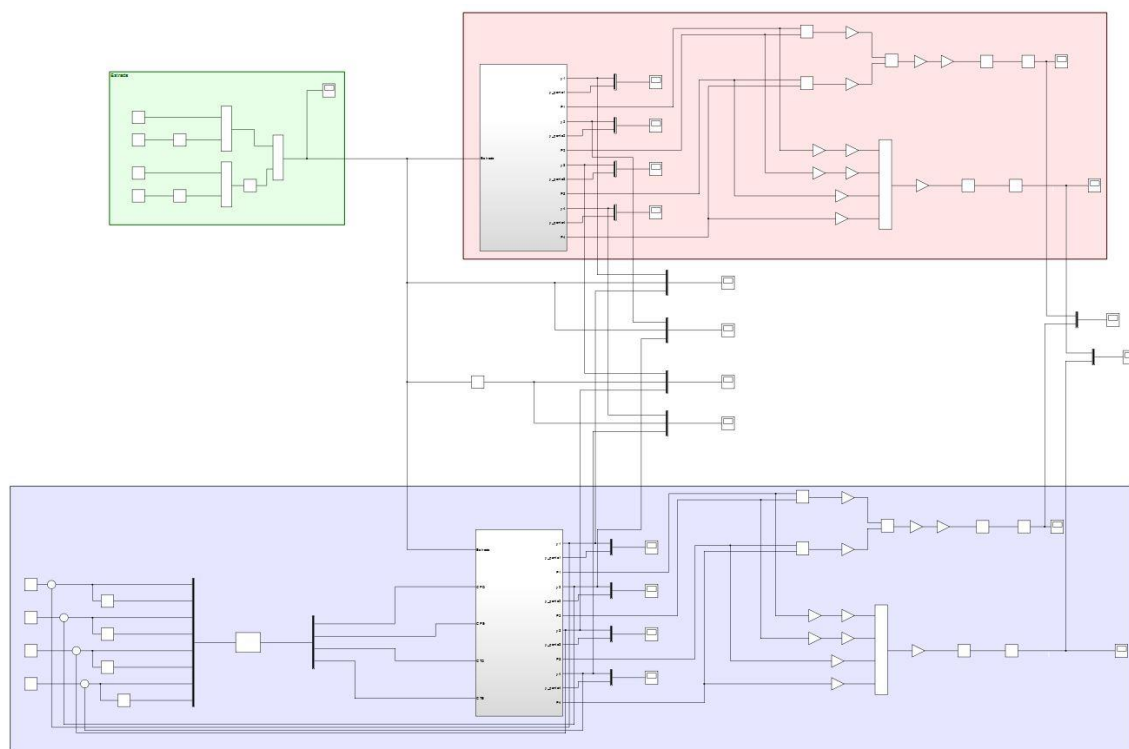


Figura 60 – Modelo de suspensão semi-ativa para um carro completo

O modelo desenvolvido para a suspensão de carro completo, apresenta as mesmas três áreas coloridas as quais facilitam a identificação de cada um dos elementos do modelo. Neste caso, optou-se por colocar o controlador difuso fora do subsistema de forma a facilitar o seu acesso, bem como a simplificar todas as ligações necessárias, uma vez que como existem oito ligações para a entrada e quatro para a saída, a quantidade de ligações iria tornar complicada a análise do modelo. Para isso, são utilizados os blocos de entrada para permitir fazer as ligações diretamente no subsistema, como mostra a Figura 61.

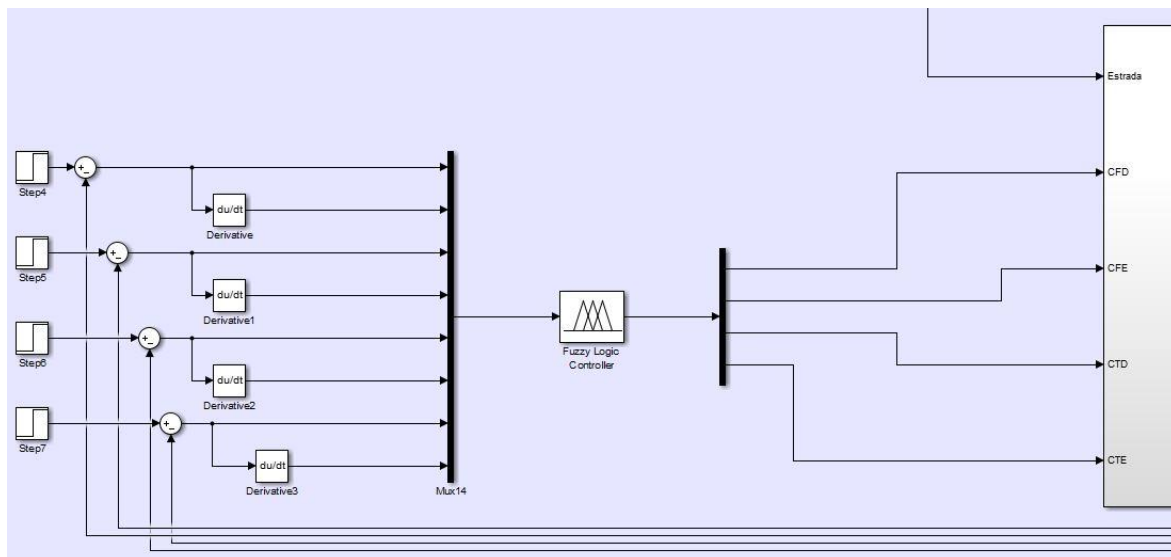


Figura 61 - Esquema do controlador difuso

Da mesma forma que no modelo de meio carro foram criados dois subsistemas que albergam os sistemas de suspensão passiva e semi-ativa, tornando o modelo geral mais simples de analisar. A Figura 62 apresenta o conteúdo do subsistema semi-ativo, uma vez que o subsistema passivo já foi apresentado na subsecção 5.1.1.

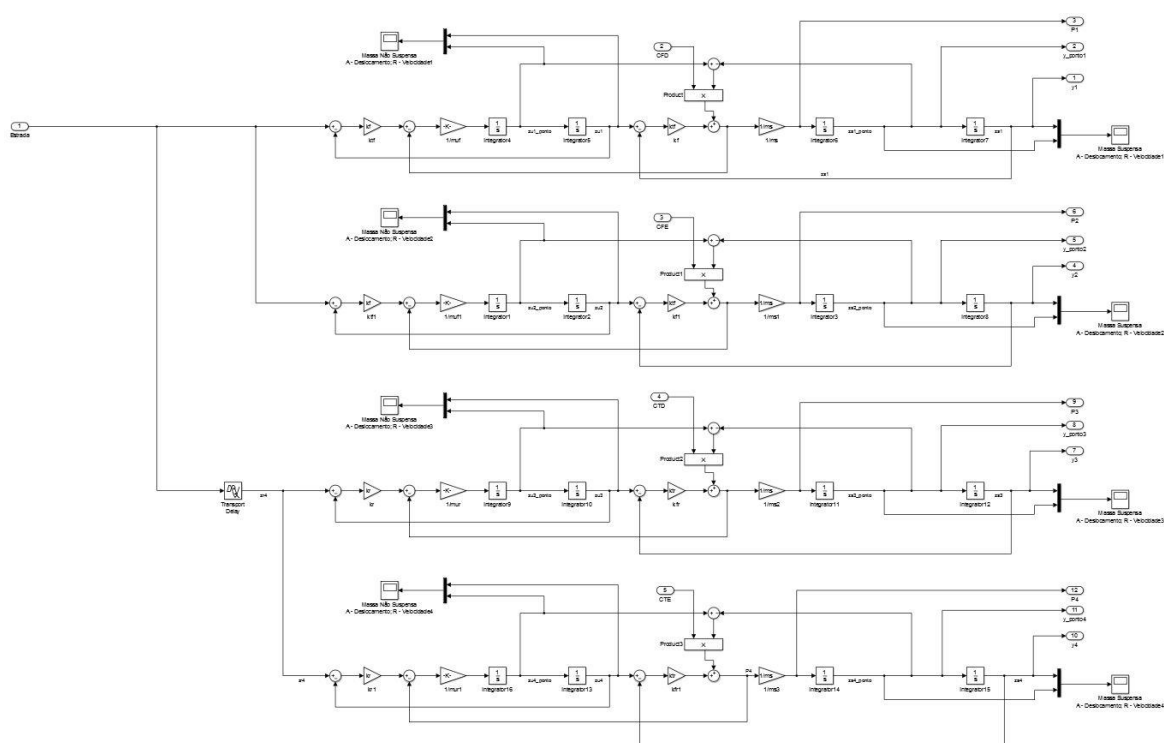


Figura 62 – Suspensão semi-ativa para um carro completo

Uma vez que se trata de um modelo de carro completo, existe um novo incremento na quantidade de variáveis a analisar. Em termos de modelo, isto representa-se pela existência de novos “ramos”, dois para representar as rodas frontais, direita e esquerda, e outros dois para representar as rodas traseiras, direita e esquerda, (do topo para o fim do esquema respetivamente).

O controlador difuso desenvolvido para o modelo mais complexo contempla o maior número de variáveis de entrada e de saída, como referido anteriormente, são oito variáveis de entradas correspondentes ao deslocamento e à velocidade de cada roda, e quatro variáveis de saída para cada amortecedor. Assim o controlador difuso apresenta a estrutura da Figura 63.

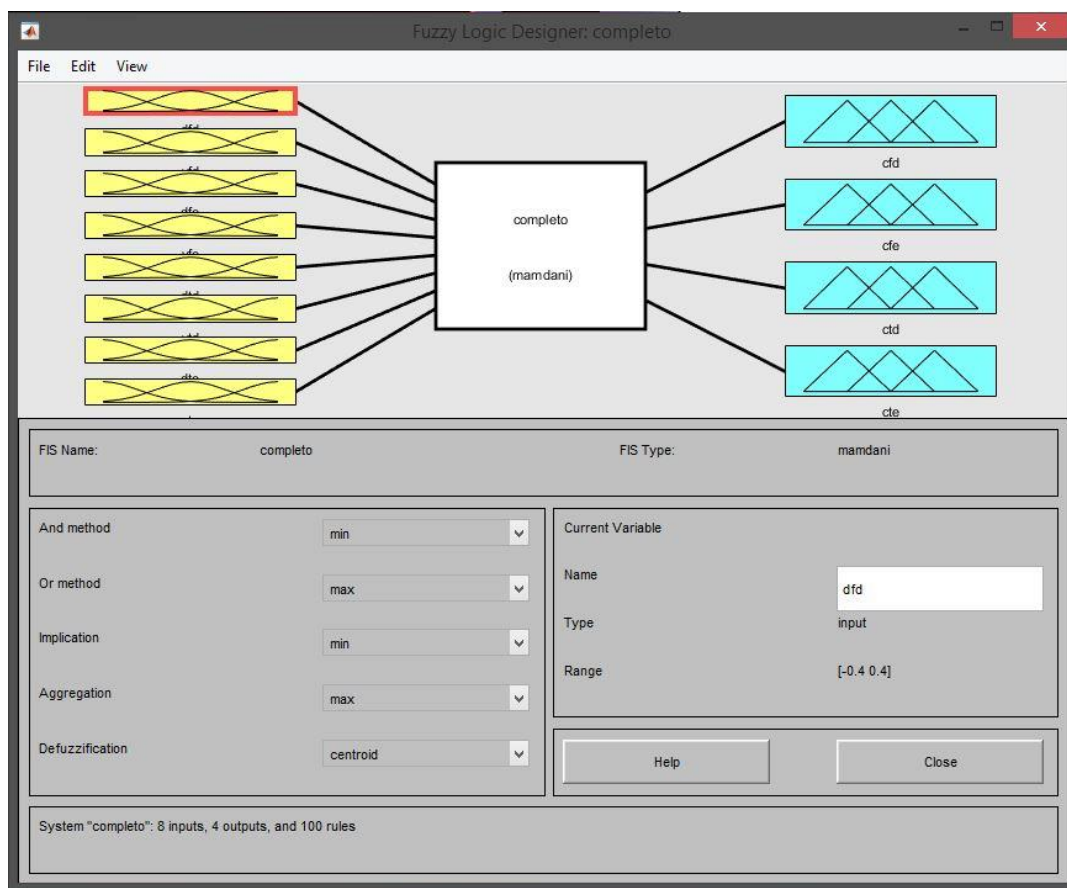


Figura 63 – Controlador difuso semi-ativo para um carro completo

De forma semelhante aos outros modelos relativos às suspensões semi-ativas, são utilizados os mesmos tipos de funções de pertinência triangulares e cinco termos linguísticos para cada uma das variáveis. Uma vez que todas as rodas foram programadas da mesma forma, irão ser só apresentadas as configurações de uma roda. As figuras 64, 65 e 66 apresentam as configurações efetuadas.

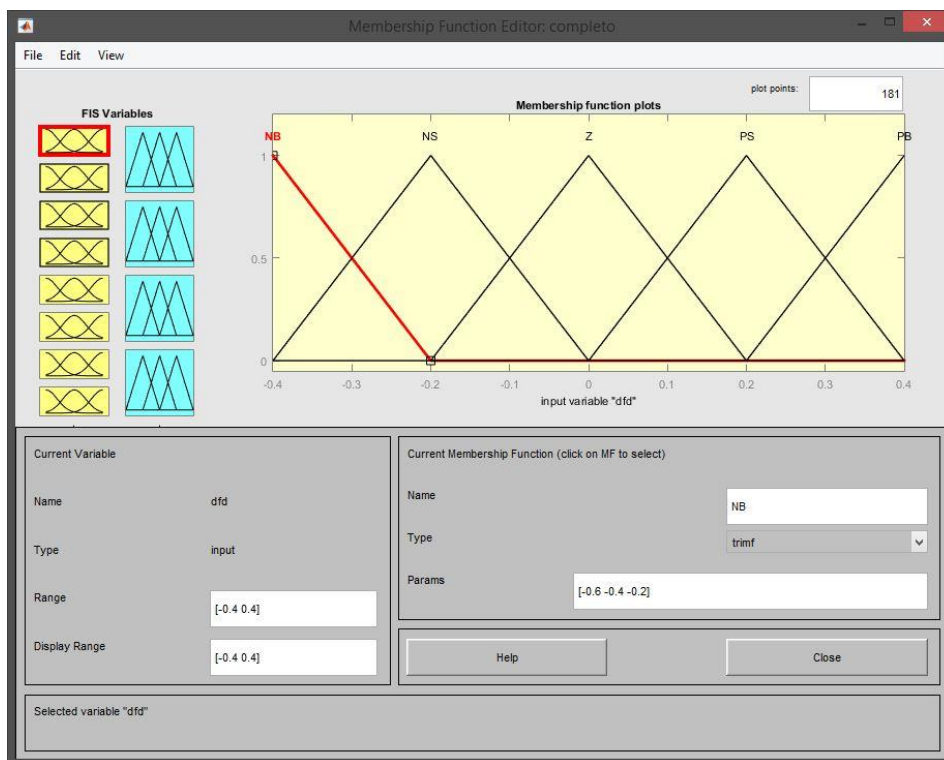


Figura 64 – Variável de entrada - deslocamento para a roda frontal direita de um carro completo

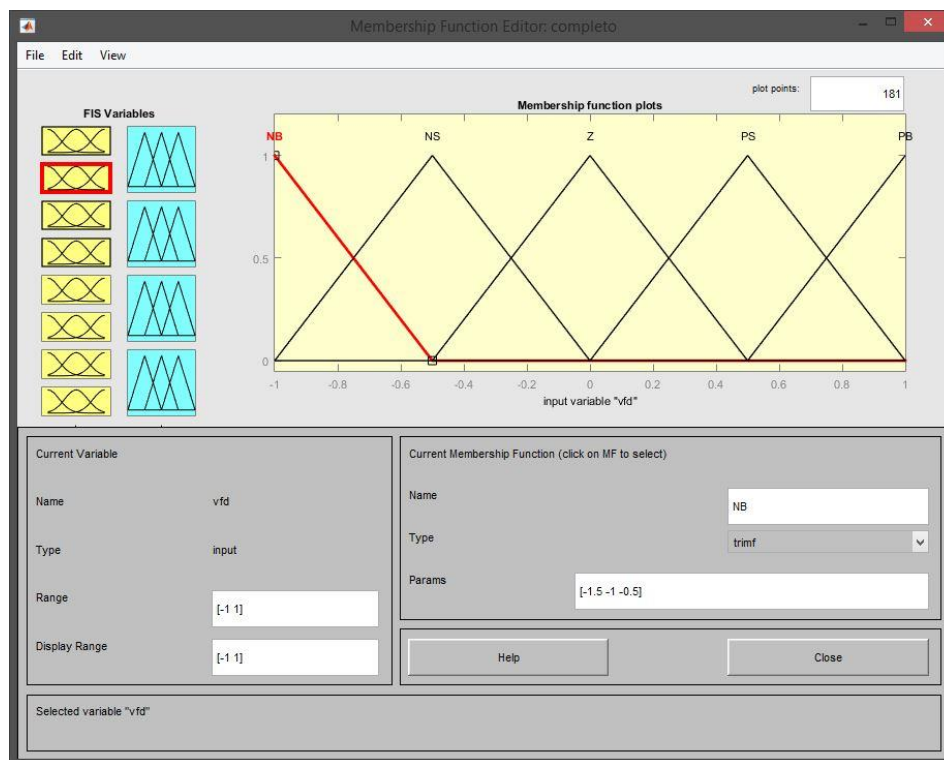


Figura 65 – Variável de entrada - velocidade para a roda frontal direita de um carro completo

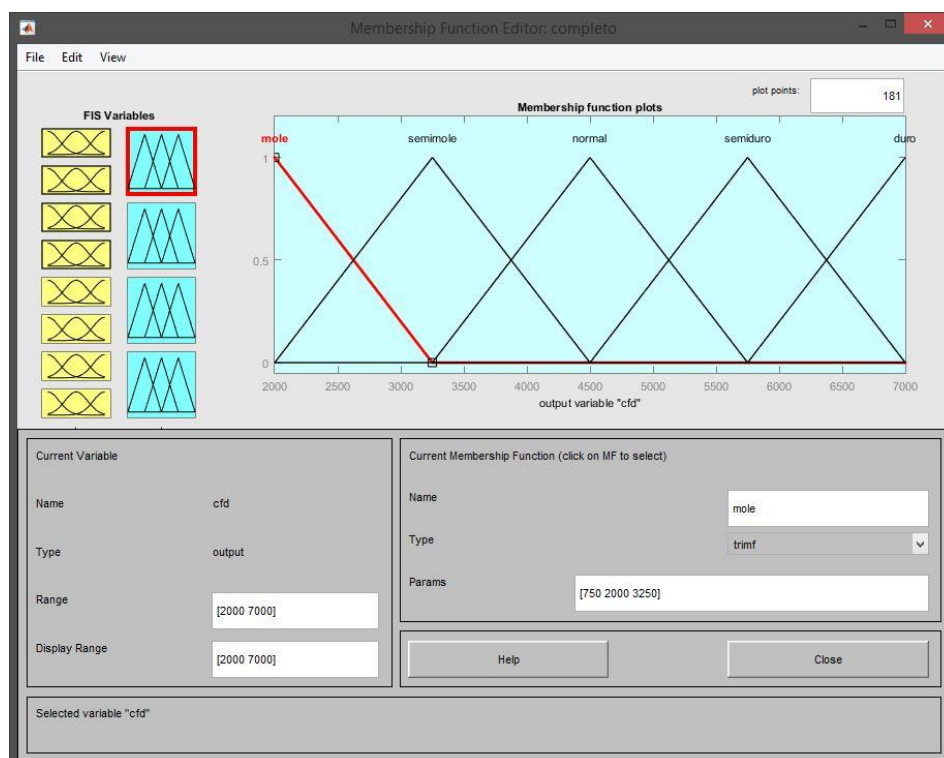


Figura 66 – Variável de saída - coeficiente de amortecimento para a roda frontal direita de um carro completo

Para relacionar as entradas com as saídas foi escrito um conjunto de regras semelhantes às existentes nos modelos anteriores. À semelhança do sucedido no modelo meio ativo, para o modelo de carro completo terão de existir um total de 100 regras (quatro conjuntos de 25 regras) onde cada conjunto é relativo a cada roda existente no modelo. Estes conjuntos de regras são idênticos uns aos outros, uma vez que as diferenças entre as rodas são desprezados pelo controlador. A Tabela 8 apresenta o conjunto de regras relativos à roda frontal direita.

Tabela 8 – Matriz de regras difusas para um carro completo

Δv Δd	NB	NS	Z	PS	PB
NB	M	M	SM	SM	N
NS	M	SM	SM	SM	SD
Z	SM	SM	N	SD	SD
PS	SM	N	SD	SD	D
PB	N	SD	SD	D	D

5.1.3 Suspensões totalmente ativas

Depois de terem sido expostos os três modelos desenvolvidos para as suspensões semi-ativas, nesta secção irão ser apresentados todos os modelos desenvolvidos para as suspensões totalmente ativas, assim como os respetivos controladores e parâmetros necessários para o seu correto funcionamento. Os modelos ativos desenvolvidos pretendem replicar a utilização de motores lineares, semelhantes aos utilizados nas suspensões Bose (referidas na subsecção 2.4.2.1).

5.1.3.1 Quarto de carro

De novo, o primeiro modelo desenvolvido foi o de quarto de carro, pois este é o mais simples de criar. A Figura 67 apresenta o modelo para um quarto de carro com suspensão ativa.

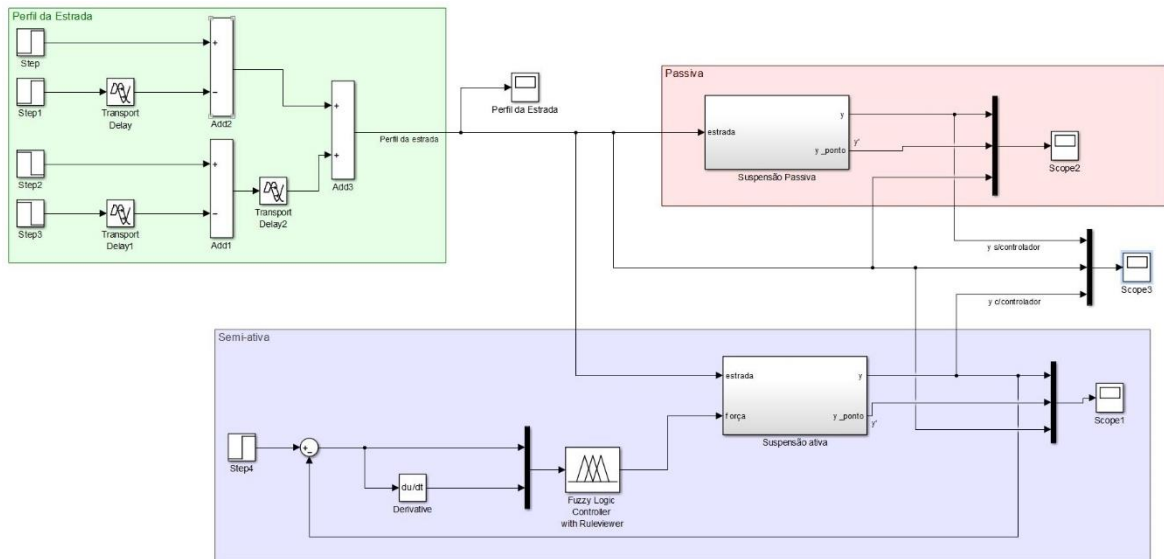


Figura 67 – Modelo de suspensão ativa para um quarto de carro

Durante o desenvolvimento dos modelos de suspensão ativa, optou-se por proceder do mesmo modo que para o desenvolvido para os modelos semi-ativos, nomeadamente no que diz respeito à separação por cores e à criação de subsistemas que facilitassem a análise dos mesmos. Assim, a área verde corresponde ao perfil da estrada desejado o qual é partilhado por todos os modelos, a área vermelha diz respeito à suspensão passiva e a azul à suspensão totalmente ativa. O subsistema ativo é apresentado pela Figura 67.

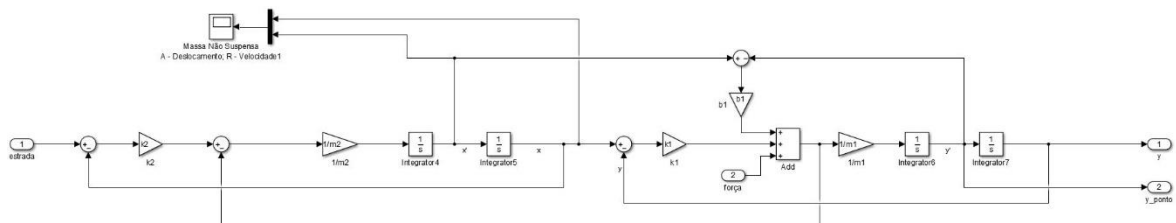


Figura 68 – Suspensão ativa para um quarto de carro

O modelo de suspensão passiva mantém-se igual ao apresentado anteriormente, enquanto o modelo totalmente ativa apresenta diferenças face aos modelos semi-ativos. Como foi referido no início do capítulo, os modelos ativos desenvolvidos pretendem replicar o funcionamento de suspensões equipadas com motores lineares semelhantes aos utilizados nas suspensões Bose. Isso é notório pois existe um bloco de soma que aplica a força que o controlador difuso indica.

Para este modelo, foi desenvolvido um novo controlador difuso que apresenta semelhanças e diferenças face aos controladores anteriores. É semelhante uma vez que utiliza os mesmos cinco termos linguísticos e funções de pertinência triangulares para as entradas e para as saídas. Uma vez que agora a função do controlador é definir um valor para a força que o motor tem de aplicar, é necessário existir uma gama positiva e outra negativa na saída do controlador, coisa que não acontecia nos controladores dos modelos semi-ativos. A estrutura do controlador desenvolvido para este modelo pode ser visualizado na Figura 69.

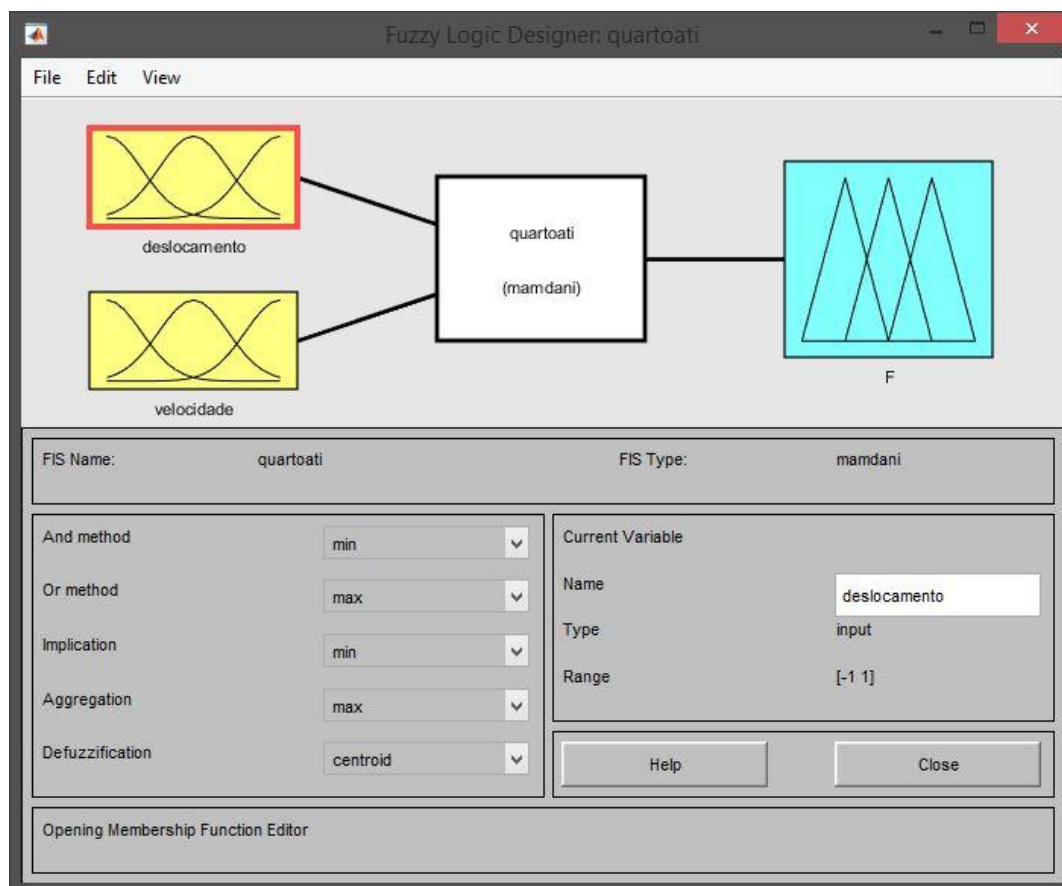


Figura 69 – Controlador difuso ativo para um quarto de carro

Como se trata de um modelo de quarto de carro, existem apenas três variáveis a configurar, as mesmas que foram configuradas no modelo semi-ativo equivalente. As figuras 70, 71 e 72 mostram o aspeto de cada variável configurada.

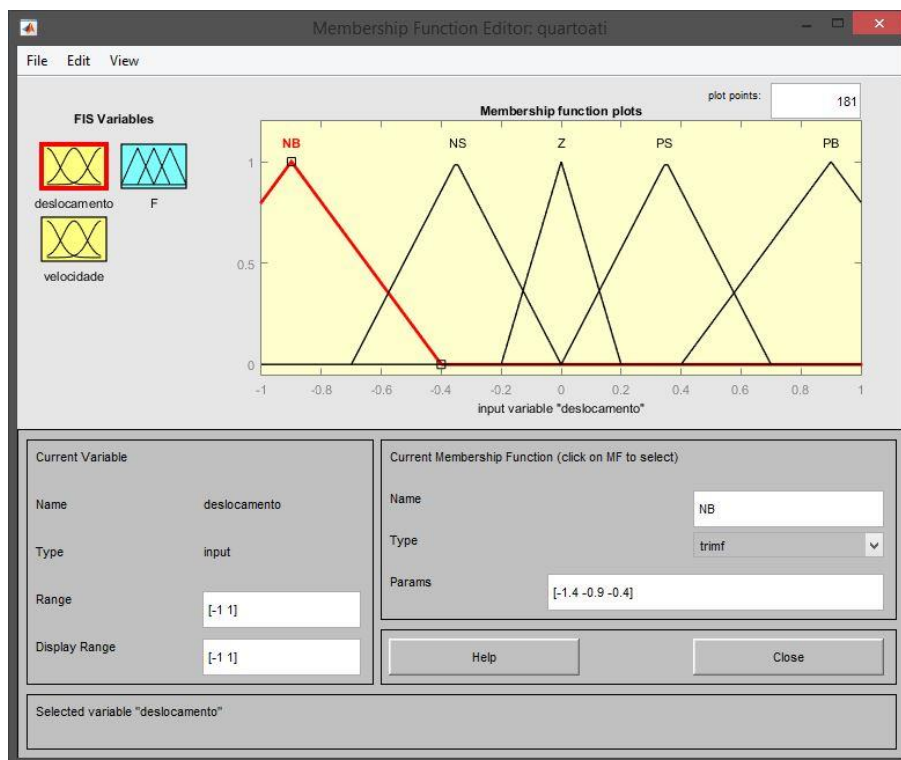


Figura 70 – Variável de entrada - deslocamento para um quarto de carro

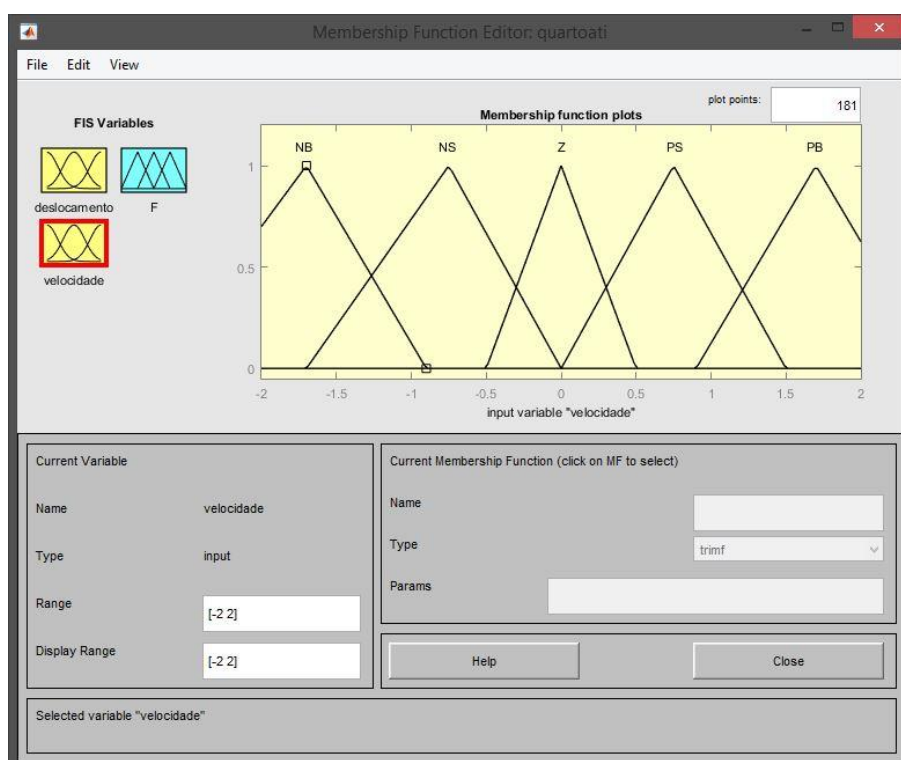


Figura 71 – Variável de entrada - velocidade para um quarto de carro

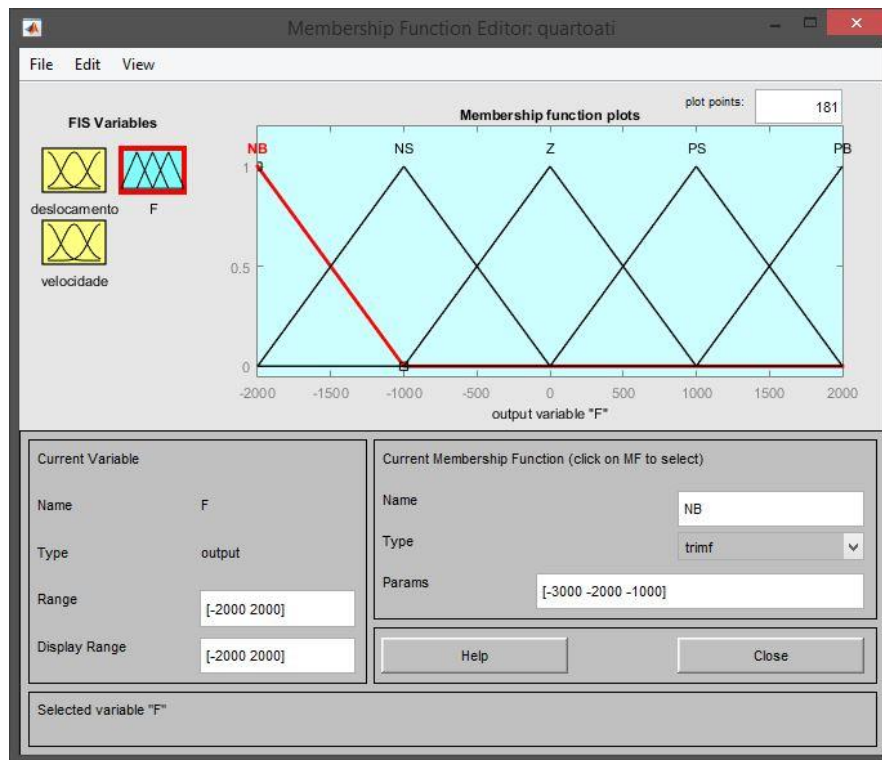


Figura 72 - Variável de saída - força para um quarto de carro

Para fazer a ligação entre as variáveis de entrada e de saída, foi definido um conjunto de regras análogas à dos modelos anteriores, no entanto, como aqui o que controlamos é a força que o motor aplica na suspensão usou-se outros termos linguísticos. A Tabela 9 mostra a matriz de regras definidas para este controlador.

Tabela 9 – Matriz de regras difusas ativas para um quarto de carro

$\Delta d \backslash \Delta v$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NS	NS	Z	PS	PS
PS	NS	Z	PS	PS	PB
PB	Z	PS	PS	PB	PB

onde

NB – *Negative Big*

PB – *Positive Big*

NS – *Negative Small*

PS – *Positive Small*

Z – Zero

5.1.3.2 Meio carro

O modelo de meio carro desenvolvido para a suspensão totalmente ativa pode ser observado na Figura 73.

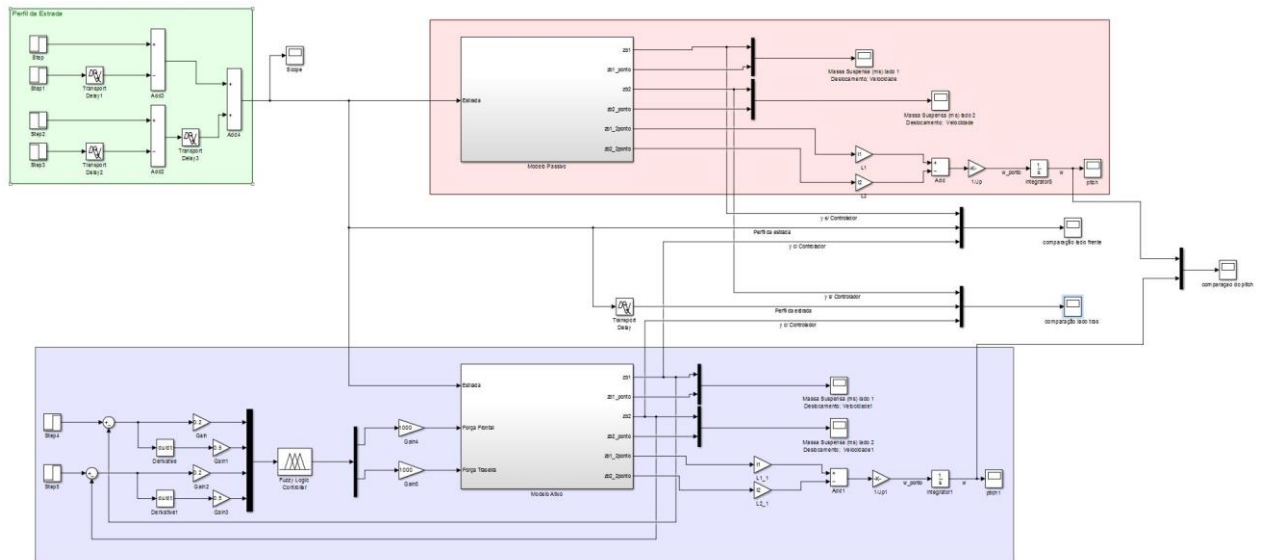


Figura 73 - Modelo de suspensão ativa para meio carro

As secções correspondentes ao perfil de estrada e à suspensão passiva mantem-se iguais aos do modelo de meio carro semi-ativo presente na Figura 46. O modelo ativo apresenta alterações que permitem incorporar as forças que são aplicadas pelos motores lineares, como mostra a Figura 74.

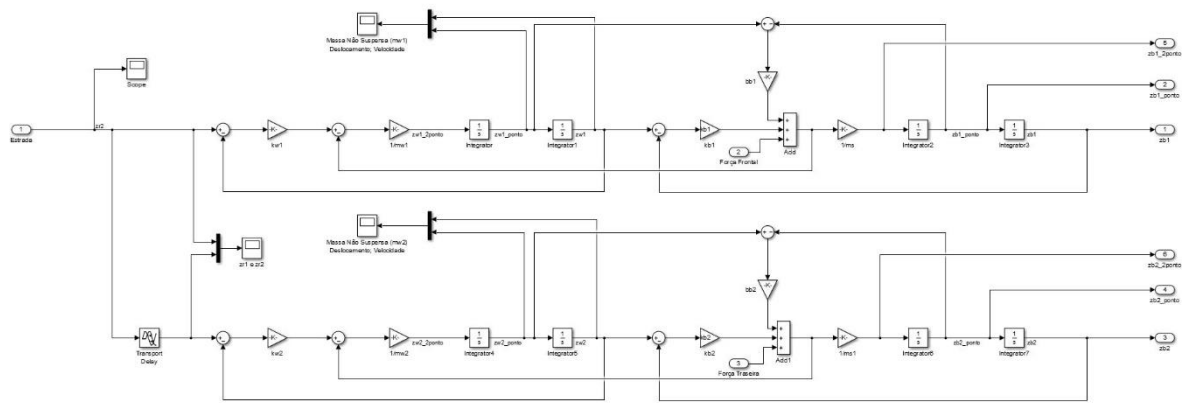


Figura 74 - Suspensão ativa para meio carro

O esquema do controlador difuso a utilizar neste modelo, foi normalizado de forma a facilitar as alterações ao nível das funções de pertença, com vista a melhorar os resultados obtidos, o que será explicado com maior detalhe no capítulo seguinte, relativo aos testes dos sistemas desenvolvidos. A Figura 75 apresenta o esquema para o controlador normalizado.

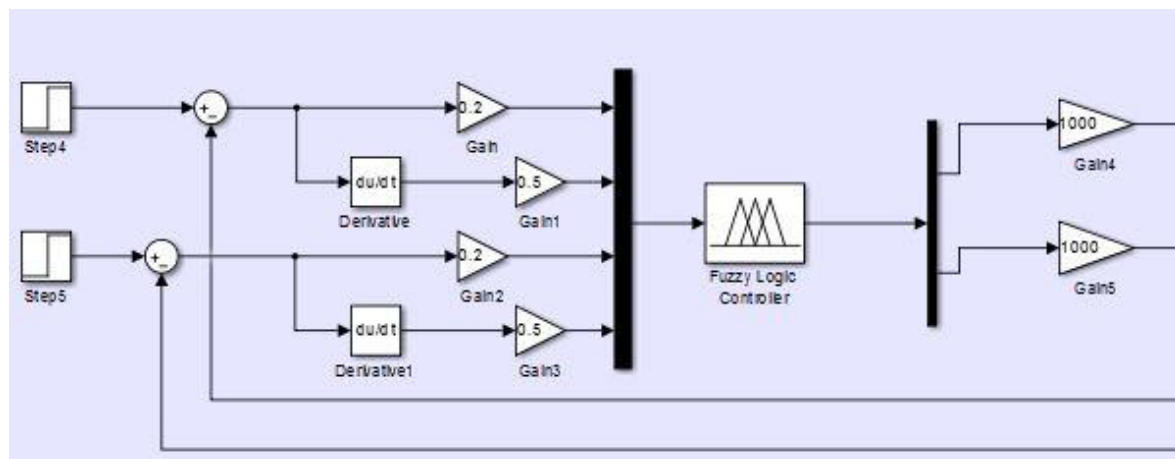


Figura 75 – Controlador difuso normalizado para meio carro

A estrutura desenvolvida para este controlador é semelhante aos restantes apresentados anteriormente, mas uma vez que é normalizado, as variáveis apresentam todas o mesmo intervalo $[-1,1]$, que posteriormente será multiplicado por um ganho. Esta estrutura é apresentada na Figura 76.

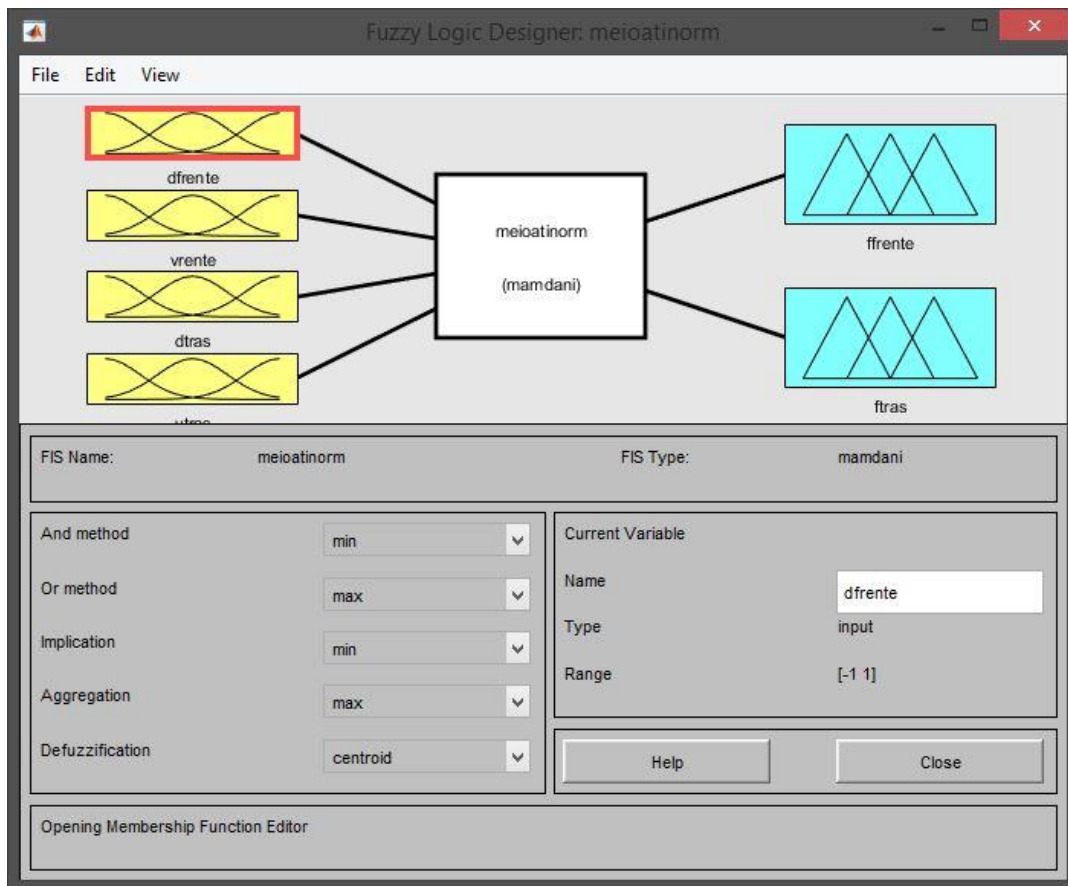


Figura 76 - Controlador difuso ativo para meio carro

As funções de pertença que servem para caracterizar cada uma das variáveis e os seus termos linguísticos são do tipo triangulares, mas sofreram algumas alterações, com a finalidade de melhorar o comportamento geral do sistema. Estas alterações podem ser visualizadas nas figuras 77 e 78.

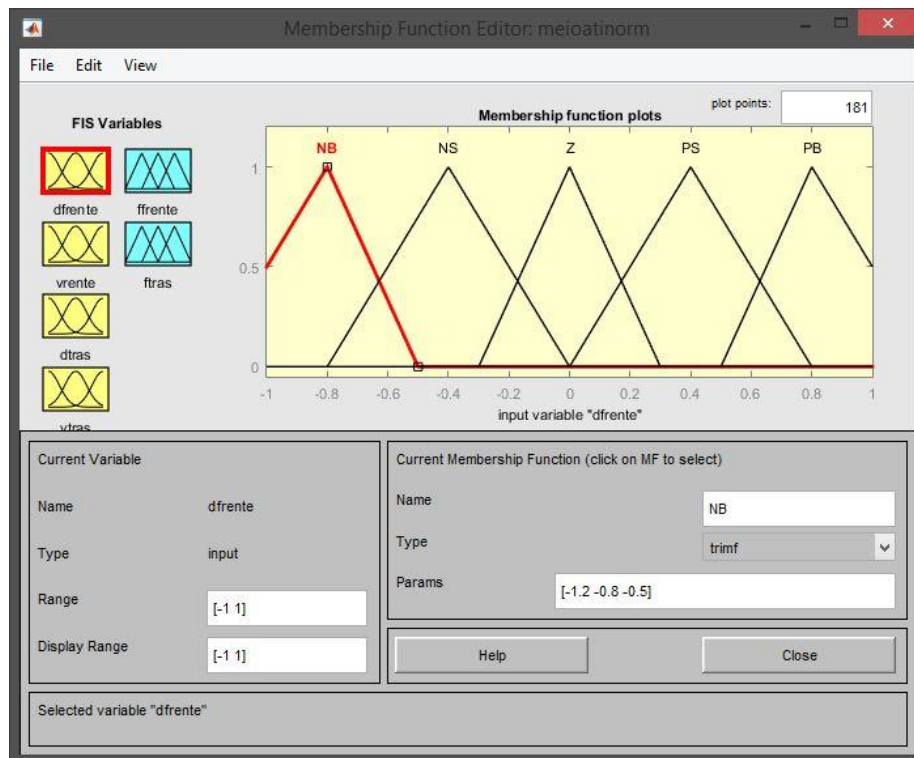


Figura 77 - Variável de entrada - deslocamento para a roda frontal de meio carro

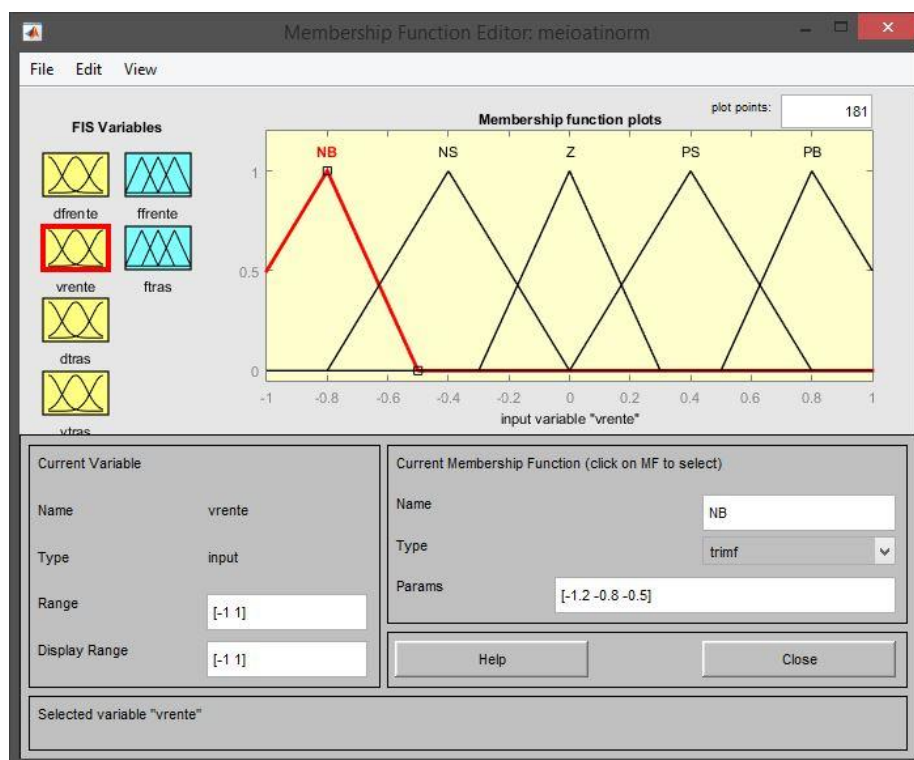


Figura 78 - Variável de entrada - velocidade para a roda frontal de meio carro

Como é possível verificar, as alterações efetuadas nas funções de pertença prendem-se com o facto de terem sido reduzidos os limites de cada intervalo, para que os diferentes termos linguísticos tivessem a sua gama de valores mais adequada aos valores em que a suspensão se encontra, em diferentes instantes de tempo. As variáveis de saída não foram sujeitas a quaisquer alterações, uma vez que não iriam provocar benefícios no comportamento do sistema. A Figura 79 mostra a configuração da variável de saída.

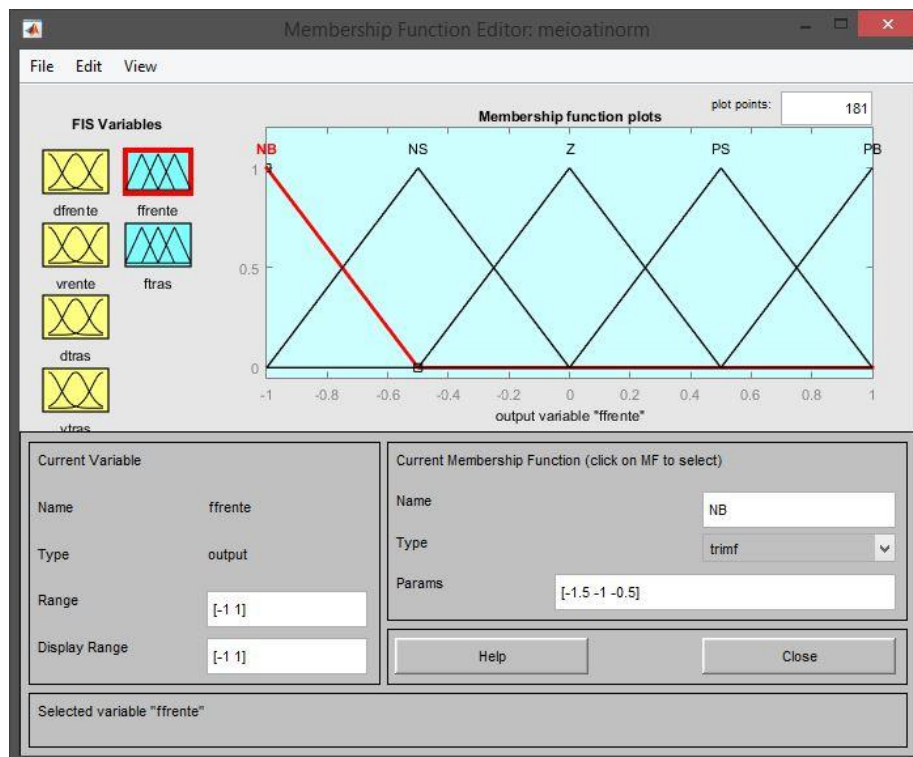


Figura 79 - Variável de saída - força para a roda frontal de meio carro

Depois de configuradas todas as variáveis do controlador, foram novamente escritas as regras que permitem relacionar as entradas do controlador com as respetivas saídas. Do mesmo modo que foi explicado durante os modelos semi-ativos com mais do que uma roda, a Tabela 10 apresenta a matriz de regras para a roda frontal sendo o conjunto de regras relativo à roda traseira idêntico.

Tabela 10 – Matriz de regras difusas ativo para a roda frontal de meio carro

$\Delta d \backslash \Delta v$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NS	NS	Z	PS	PS
PS	NS	Z	PS	PS	PB
PB	Z	PS	PS	PB	PB

5.1.3.3 Carro completo

O modelo desenvolvido para as suspensões totalmente ativas, permite analisar a resposta de todas as rodas às deformidades da estrada e verificar se o controlador difuso consegue transmitir a informação correta a cada roda de forma independente. A Figura 80 apresenta o esquema do modelo desenvolvido.

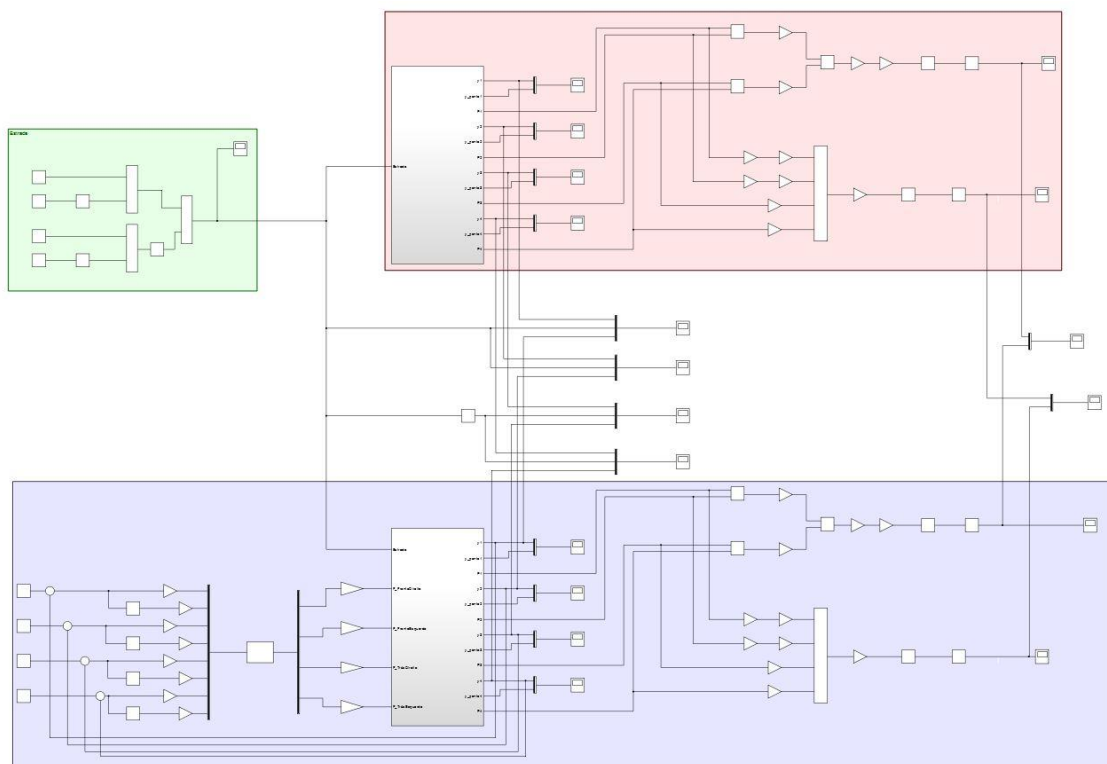


Figura 80 – Modelo de suspensão ativa para um carro completo

Uma vez que o subsistema relativo à suspensão passiva é o mesmo que o utilizado no modelo semi-ativo, os aspetos relevantes sobre este subsistema já foram expostos. O subsistema que representa a suspensão ativa, à semelhança dos restantes modelos totalmente ativos, ilustra os elementos que representam os motores lineares. Na Figura 81 é possível visualizar o subsistema correspondente à suspensão ativa.

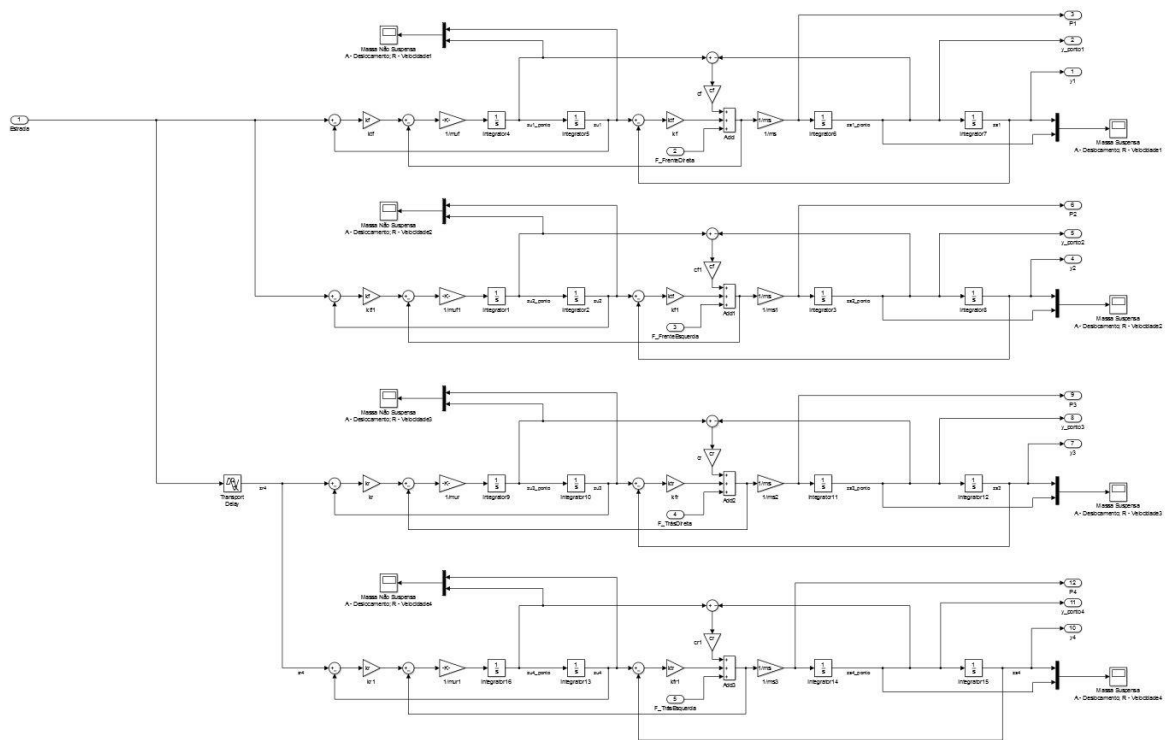


Figura 81 - Suspensão ativa para um carro completo

Para o esquema do controlador difuso a utilizar, optou-se por utilizar a mesma estratégia adotada no modelo de meio carro, nomeadamente a normalização do controlador. Neste modelo em particular, isto apresenta diversas vantagens, entre elas, a mais fácil identificação e manutenção das diferentes ligações e variáveis, uma vez que existe um total de oito entradas e 4 saídas. A Figura 82 ilustra com mais detalhe o esquema referido.

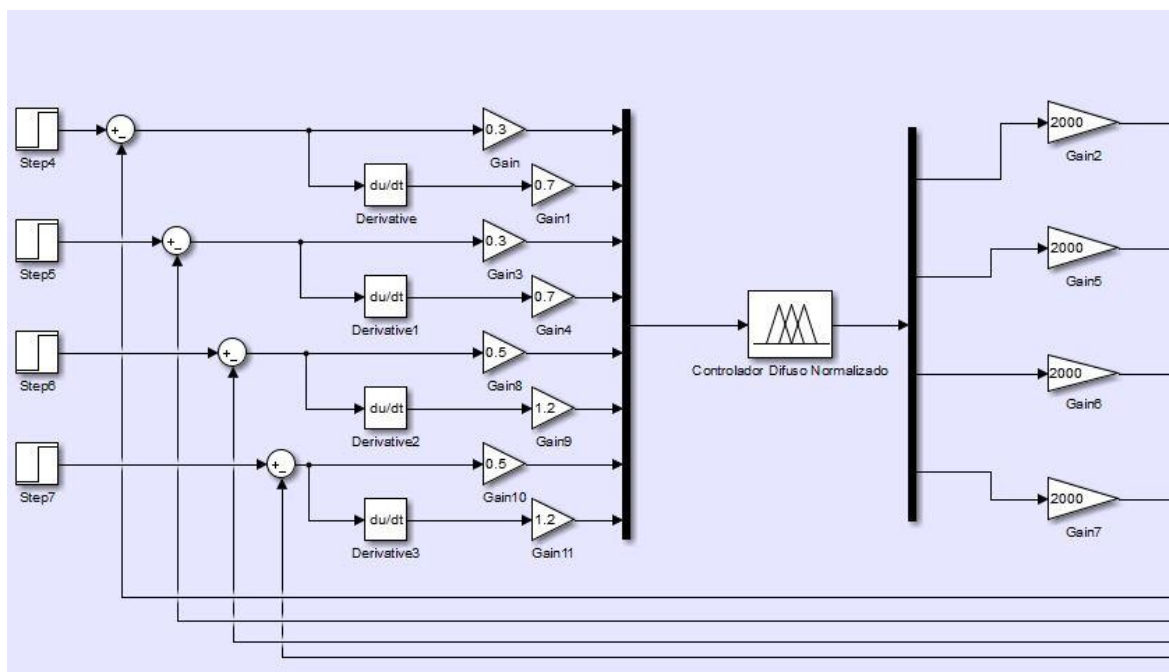


Figura 82 – Controlador difuso normalizado para um carro completo

O controlador difuso desenvolvido para controlar este último modelo possui, como referido, oito entradas e quatro saídas o que faz dele o mais complexo. A estrutura deste controlador pode ser verificada na Figura 83.

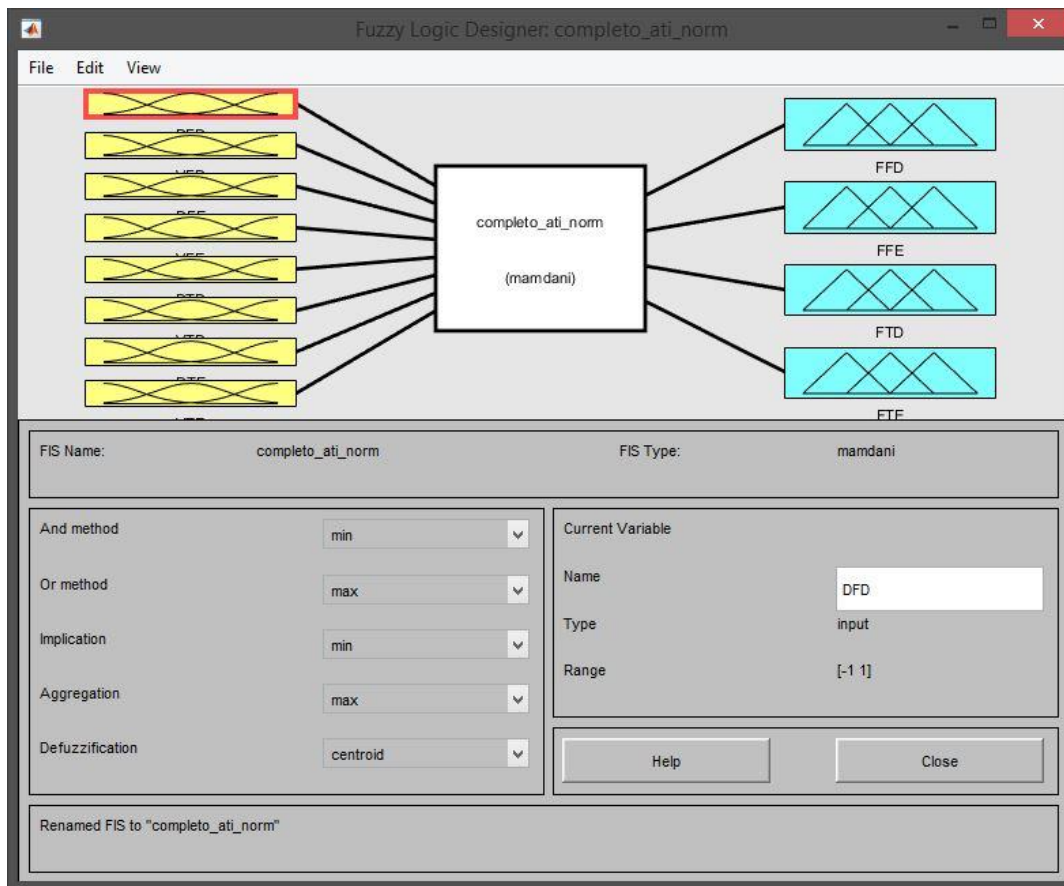


Figura 83 – Controlador difuso ativo para um carro completo

Cada variável presente neste controlador, apresenta o mesmo conjunto de cinco termos linguísticos, caracterizados por funções de pertença triangulares, que já tem vindo a ser utilizados ao longo deste estudo. Uma vez que todas as variáveis de entrada e de saída apresentam a mesma configuração, irão apenas ser apresentadas as variáveis relativas a uma das rodas do modelo. As figuras 84, 85 e 86 apresentam as configurações escolhidas.

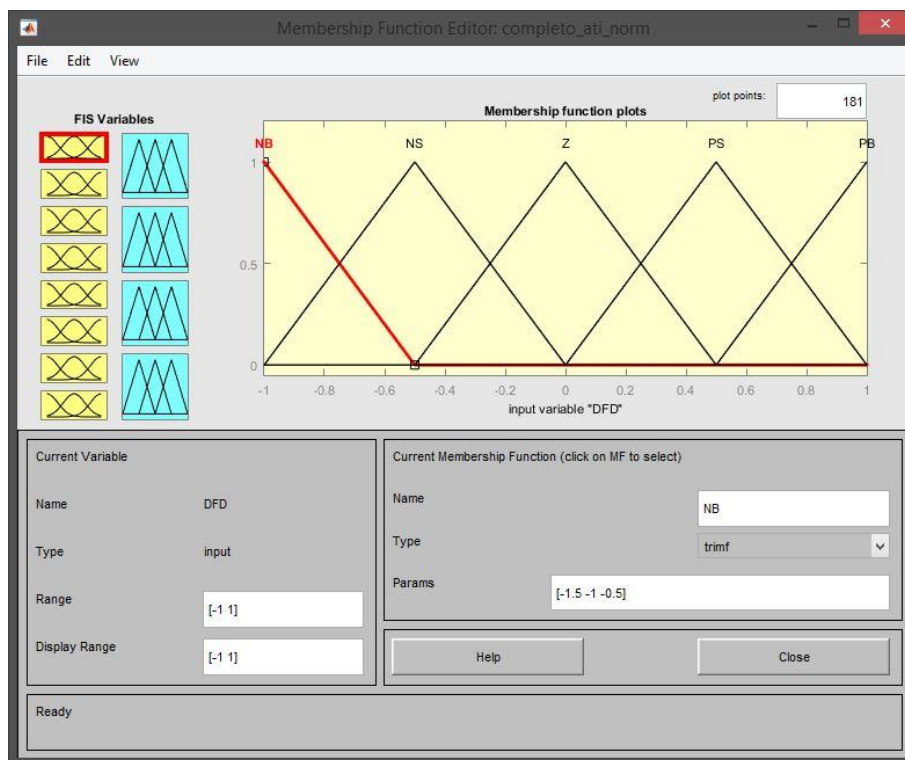


Figura 84 – Variável de entrada - deslocamento para a roda frontal direita de um carro completo

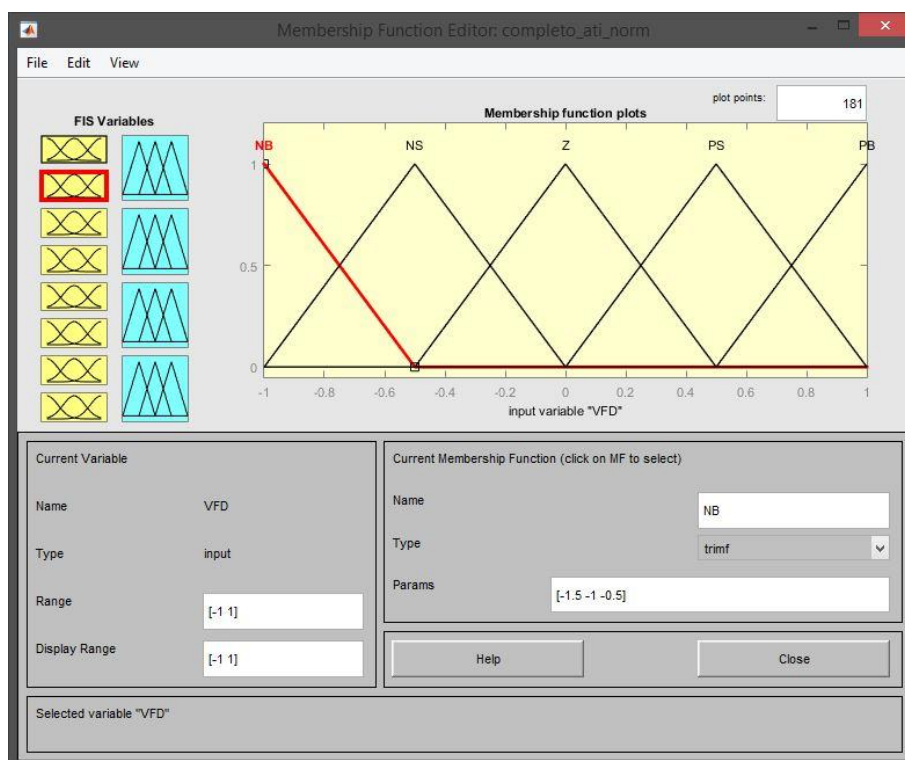


Figura 85 – Variável de entrada - velocidade para a roda frontal direita de um carro completo

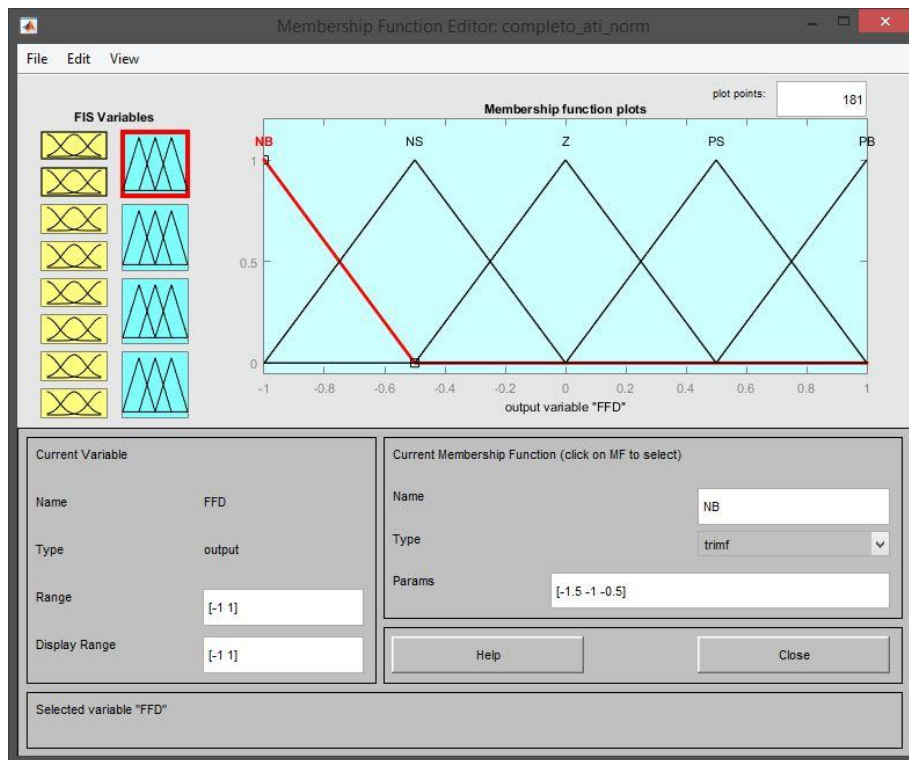


Figura 86 – Variável saída - força para a roda frontal direita de um carro completo

Tal como em todos os controladores desenvolvidos anteriormente, existe um conjunto de regras que relaciona as entradas do controlador difuso com as suas saídas. Uma vez que o modelo de carro completo consegue estudar todas as rodas em simultâneo, existe a necessidade de haver uma quantidade elevada de regras, neste caso 100 regras divididas em conjuntos de 25 para cada roda. A Tabela 11 apresenta apenas um dos conjuntos de regras definidos para uma das rodas, uma vez que todos os conjuntos de regras são iguais.

Tabela 11 – Matriz de regras difusas ativo para a roda direita frontal de um carro completo

$\Delta d \backslash \Delta v$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NS	NS	Z	PS	PS
PS	NS	Z	PS	PS	PB
PB	Z	PS	PS	PB	PB

6. TESTES E RESULTADOS

Depois de terem sido explorados todos os modelos desenvolvidos, necessários para o estudo em causa, são agora apresentados todos os testes efetuados aos modelos, de forma a validar o seu bom funcionamento e também se possível, sugerir-nos propostas para futuras aplicações práticas.

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos de cada tipo de suspensão, semi-ativa e totalmente ativa, para cada um dos tipos de modelos, a saber, quarto de carro, meio carro e carro completo, comparativamente com as suspensões passivas, o que nos permitirá comparar e validar os nossos modelos.

6.1. QUARTO DE CARRO

O primeiro tipo de modelo aqui apresentado é o mais simples de todos, uma vez que só analisa uma roda, pelo que apresenta menos resultados. Para se poder obter algum tipo de dados é necessário definir um modelo caracterizando os parâmetros para o veículo a analisar. Para o primeiro caso foram definidos os seguintes valores, apresentados na Tabela 12, os quais estão de acordo com carros de pequenas dimensões.

Tabela 12 – Dados do veículo para um quarto de carro [Rashid]

$b_1 = 290 \text{ Ns/m}$	$m_1 = 315 \text{ Kg}$
$k_1 = 40000 \text{ N/m}$	$m_2 = 45 \text{ Kg}$
$k_2 = 190000 \text{ N/m}$	

Simulando os modelos passivo e semi-ativo, obtiveram-se os seguintes resultados.

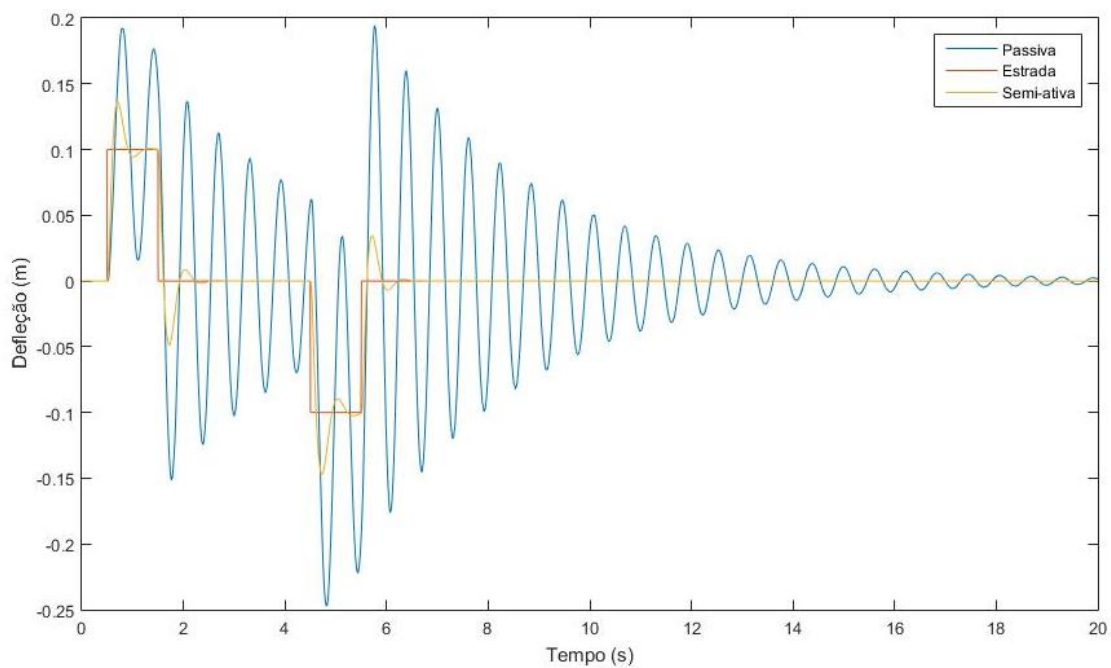


Figura 87 – Suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa para um quarto de carro

Na Figura 87 é possível observar os resultados obtidos para o modelo semi-ativo. A curva a vermelho representa o perfil da estrada que já tinha sido apresentado anteriormente. A curva a azul representa o comportamento da suspensão passiva ao longo do tempo de simulação do modelo. Como é possível observar, esta suspensão é bastante oscilatória atingindo valores de deflexão muito elevados e tempos de estabelecimento também elevados. Quando analisamos a curva a amarelo, que representa a suspensão semi-ativa, podemos observar uma

acentuada melhoria tanto ao nível da deflexão, uma vez que esta se apresenta muito reduzida, como ao nível dos tempos de estabelecimento que também são muito reduzidos.

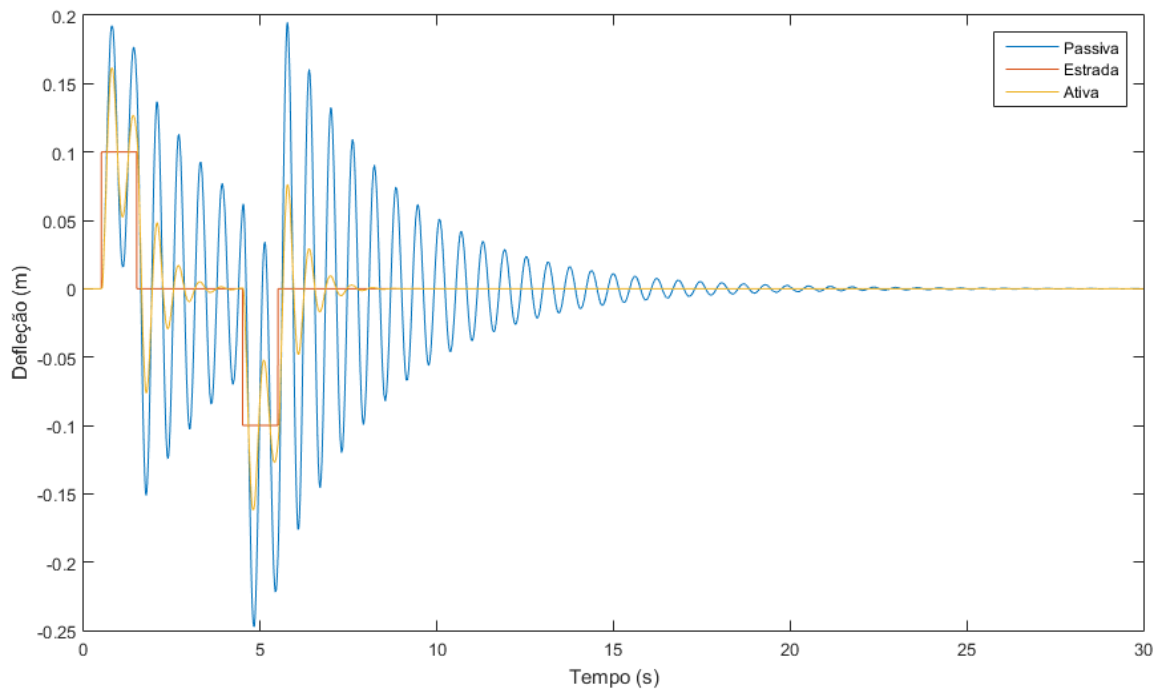


Figura 88 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para um quarto de carro

A Figura 88 ilustra os resultados obtidos para o modelo ativo comparando-o com a suspensão passiva. As curvas relativas ao perfil da estrada e da suspensão passiva mantêm-se constantes uma vez que tanto a estrada como os dados do veículo se mantêm constantes. No entanto, os resultados para a suspensão ativa são bastante melhores que os da suspensão passiva, pois existe uma redução tanto da deflexão como do tempo de estabelecimento, mas são mais fracos quando comparados aos da suspensão semi-ativa equivalente.

6.2. MEIO CARRO

Para os modelos de meio carro desenvolvidos, foram utilizados dados de um veículo real, para o qual nos foi possível obter todos os valores dos variáveis associados a esse modelo. A Tabela 13 apresenta os dados utilizados.

Tabela 13 - Dados do veículo para meio carro [STŘÍBRSKÝ]

$b_{b1} = 980 \text{ Ns/m}$	$k_{b1} = 16000 \text{ N/m}$	$m_{w2} = 35 \text{ Kg}$
$b_{b2} = 980 \text{ Ns/m}$	$k_{b2} = 16000 \text{ N/m}$	$l_1 = 1,5 \text{ m}$
$k_{w1} = 160000 \text{ N/m}$	$m_s = 16000 \text{ Kg}$	$l_2 = 2,5 \text{ m}$
$k_{w2} = 160000 \text{ N/m}$	$m_{w1} = 35 \text{ Kg}$	$J_p = 2700 \text{ Kg. m}^2$

O modelo de carro, como referido anteriormente simula duas das rodas, frontal e traseira, o qual também permite analisar o *pitch* do veículo em estudo. As figuras 89, 90 e 91 apresentam os resultados obtidos para o modelo semi-ativo, mostrando a deflexão de ambos os lados do modelo assim como uma comparação do *pitch*.

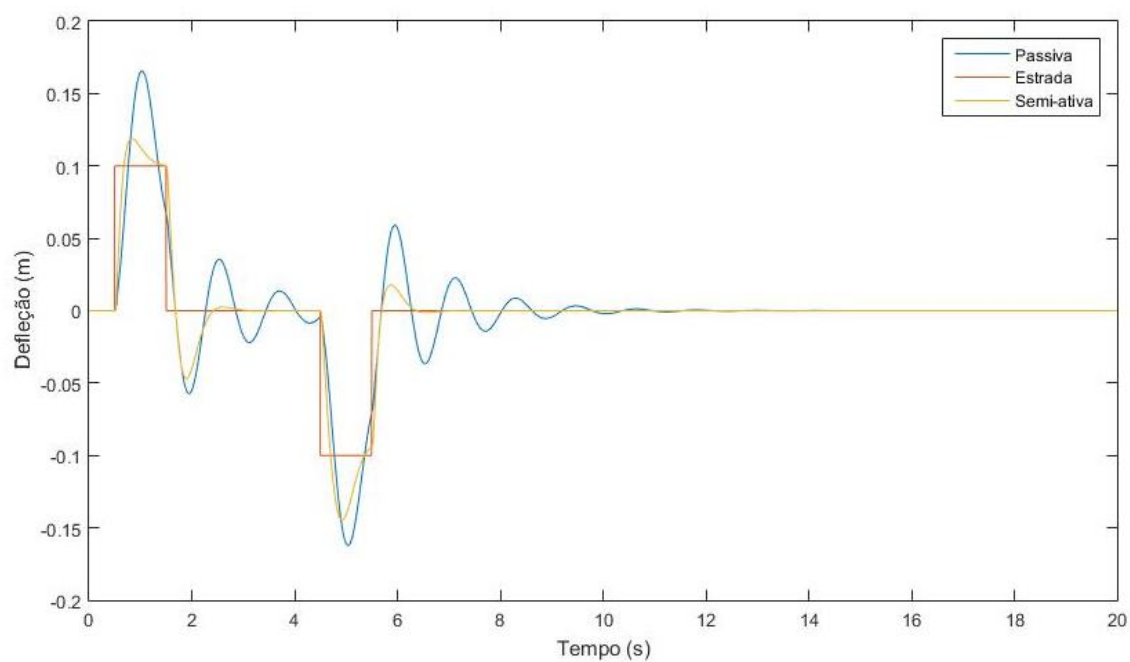


Figura 89 – Suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa para o lado frontal de um meio carro

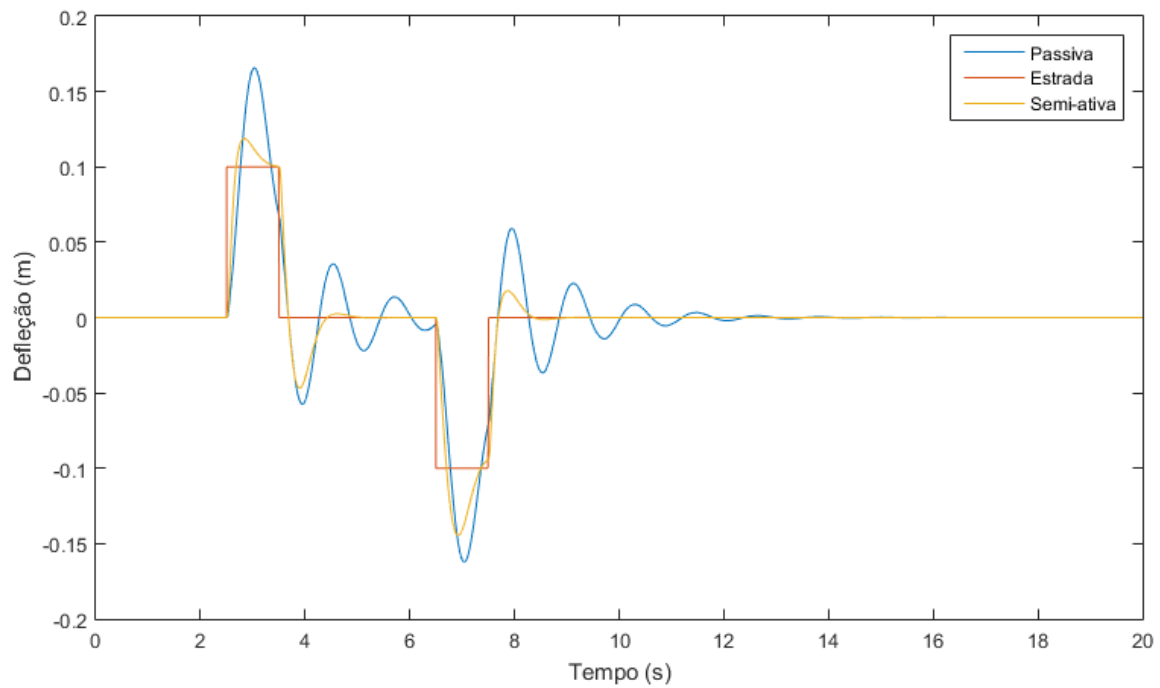


Figura 90 - Suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa para o lado traseiro de um meio carro

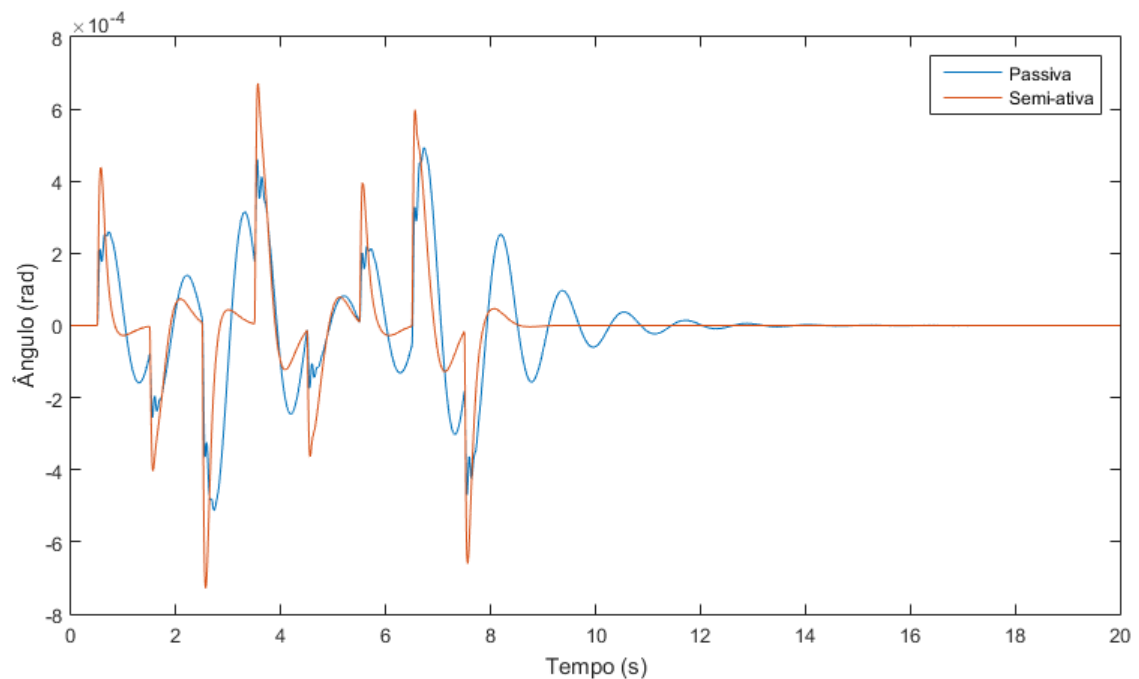


Figura 91 – Comparação do *pitch* para a suspensão passiva versus suspensão semi-ativa de um meio carro

Como é possível observar, a curva vermelha representa o perfil da estrada, a curva azul a suspensão passiva e a curva amarela a suspensão semi-ativa. Mais uma vez, a suspensão semi-ativa consegue melhorar bastante o desempenho do sistema, reduzindo a deflexão

sofrida pela massa suspensa e encurtando bastante o tempo que demora a estabilizar. Quanto aos resultados relativos ao *pitch*, apesar de apresentarem alguns momentos onde a suspensão semi-ativa possui ângulos mais elevados, acaba por estabilizar mais depressa do que a suspensão passiva.

Utilizando os mesmos dados do veículo para simular o modelo respetivo á suspensão totalmente ativa, obteve-se os seguintes resultados.

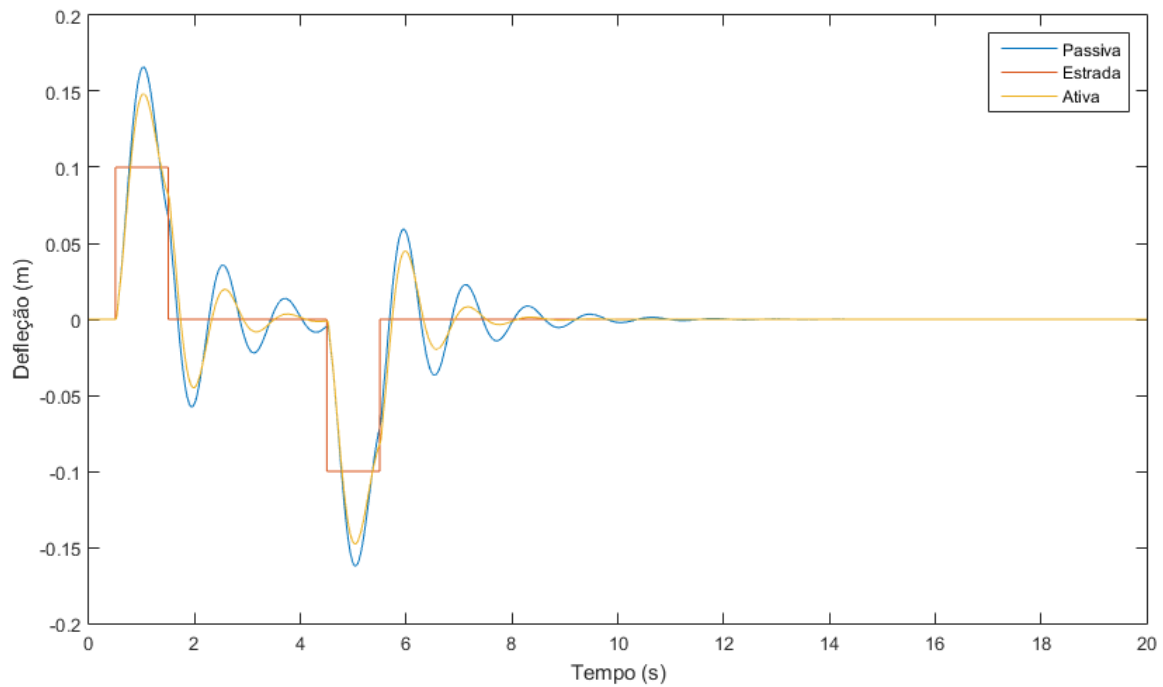


Figura 92 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para o lado frontal de um meio carro

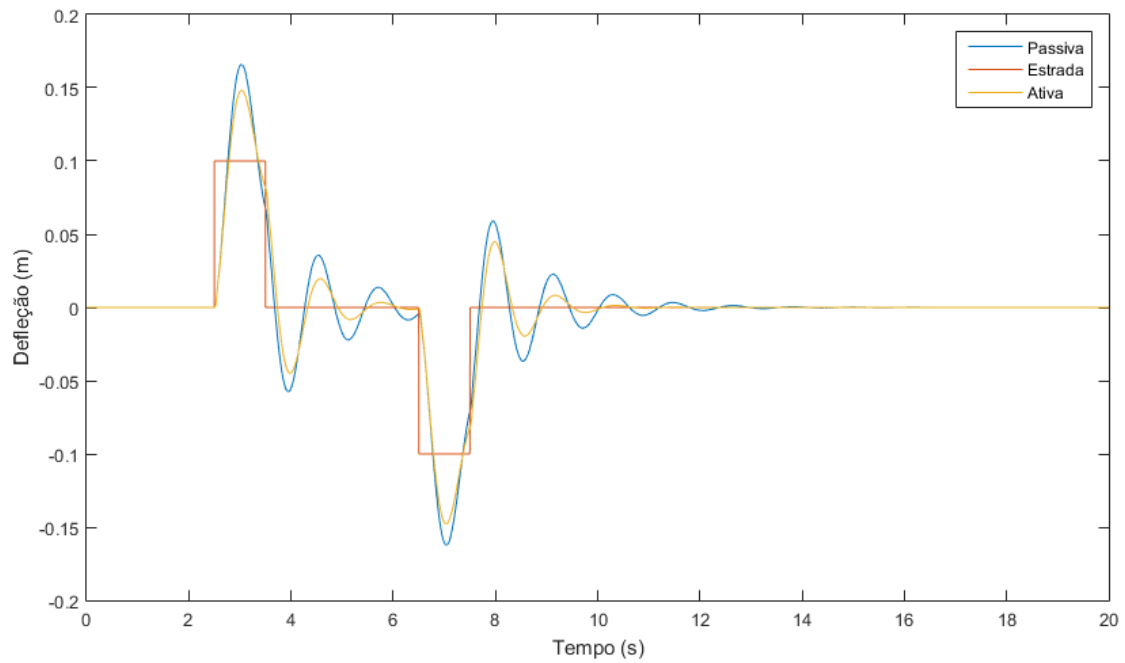


Figura 93 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para o lado traseiro de um meio carro

As figuras 93 e 94 mostram os resultados obtidos em ambos os lados da suspensão ativa, que quando comparada com a suspensão passiva traz melhorias significativas no desempenho do sistema, diminuindo a deflexão, no entanto seria de esperar uma maior diminuição, pois este tipo de suspensões é tecnologicamente mais evoluída. A Figura 94 apresenta a comparação do *pitch* obtido no modelo passivo com o obtido neste modelo ativo.

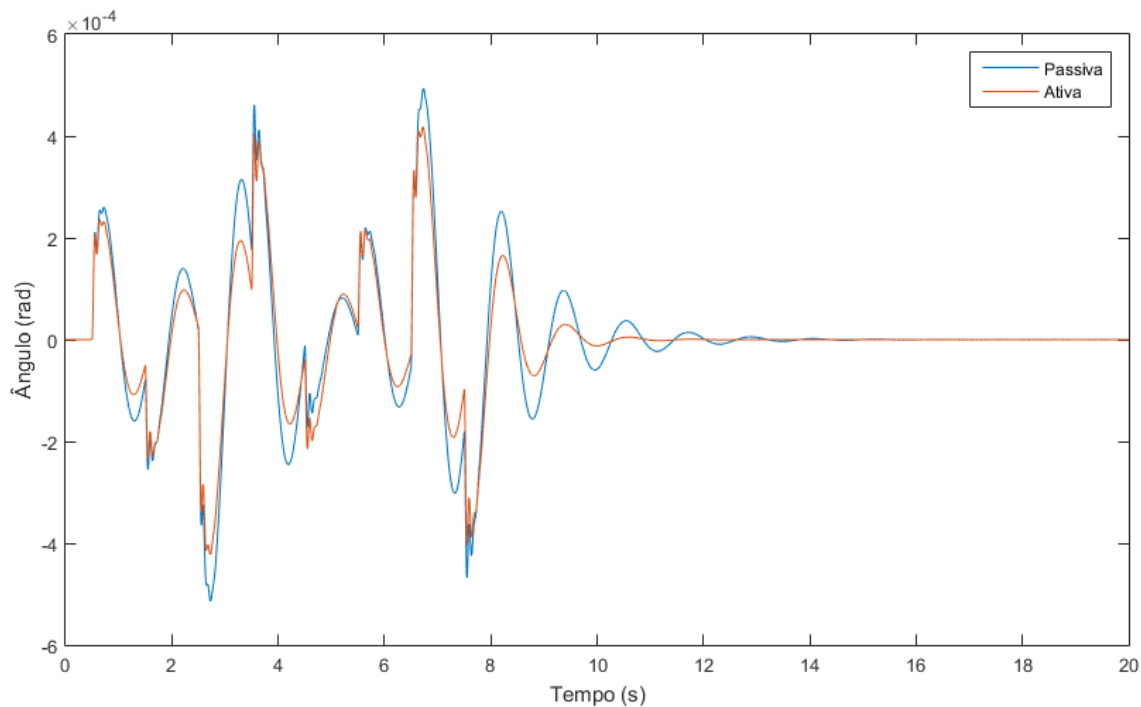


Figura 94 - Comparação do *pitch* para a suspensão passiva versus suspensão ativa de um meio carro

A suspensão ativa apresenta bons resultados para o *pitch* do sistema estando sempre com ângulos inferiores aos obtidos pela suspensão passiva e também conseguindo estabilizar mais depressa.

Comparando os desempenhos das suspensões semi-ativa e ativa (figuras 91 e 94), pode-se verificar que em termos de deflexão a suspensão semi-ativa apresenta resultados mais interessantes enquanto a suspensão ativa apresenta resultados que ficam fora das expectativas. A suspensão ativa apresenta em contrapartida um melhor *pitch* mantendo-o sempre mais baixo que o obtido no modelo semi-ativo.

6.3. CARRO COMPLETO

Para finalizar os testes a todos os modelos desenvolvidos, resta verificar o funcionamento dos modelos de carro completo. Estes modelos, como já foi referido, simulam o funcionamento das quatro rodas do veículo em simultâneo, e também o *pitch* e o *roll* do mesmo. Os dados do veículo a utilizar para a análise do modelo de carro completo estão presentes na Tabela 14.

Tabela 14 - Dados do veículo para um carro completa [Ping, Hseng]

$c_f = 400 \text{ Ns/m}$	$k_{tr} = 220000 \text{ N/m}$	$l_2 = 1,4380 \text{ m}$
$c_r = 200 \text{ Ns/m}$	$m_s = 1583 \text{ Kg}$	$w_f = 0,770 \text{ m}$
$k_f = 35000 \text{ N/m}$	$m_{uf} = 45 \text{ Kg}$	$w_r = 0,770 \text{ m}$
$k_r = 34000 \text{ N/m}$	$m_{ur} = 45 \text{ Kg}$	$I_p = 2555 \text{ Kg. m}^2$
$k_{tf} = 220000 \text{ N/m}$	$l_1 = 1,1160 \text{ m}$	$I_r = 531 \text{ Kg. m}^2$

Depois de introduzidos os valores da tabela anterior no *Matlab* de forma a finalizar a configuração do modelo, procedeu-se a simulação do modelo passivo e semi-ativo.

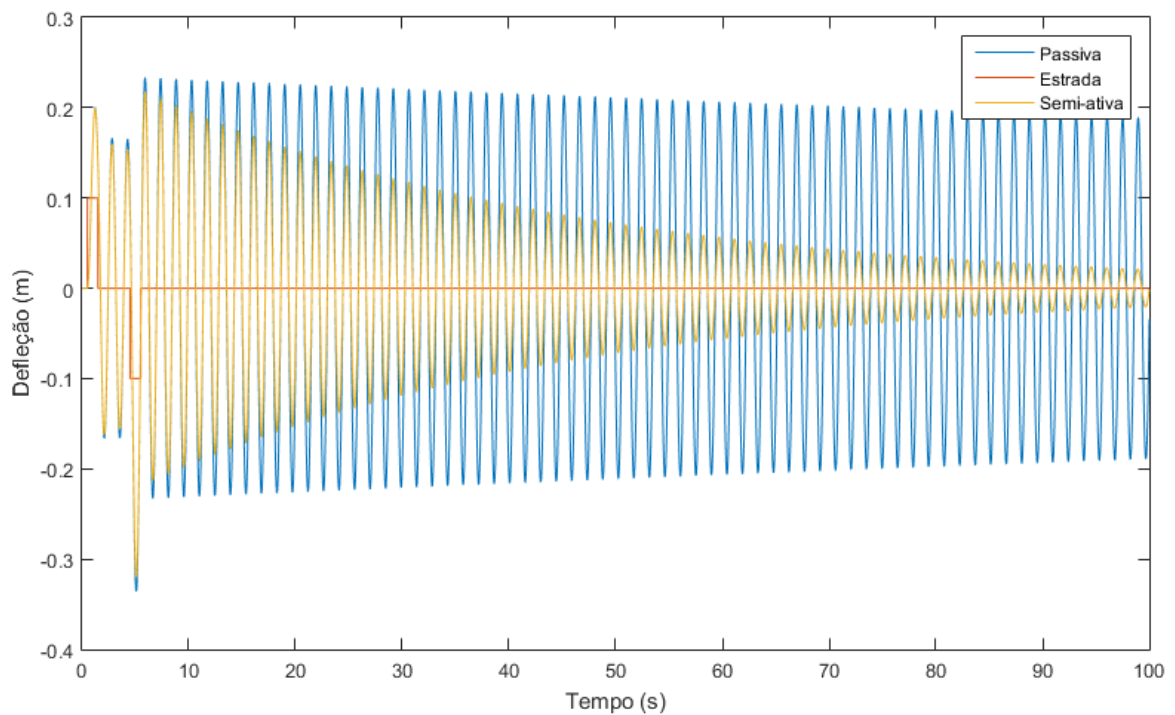


Figura 95 - Suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa para a roda frontal direita de um carro completo

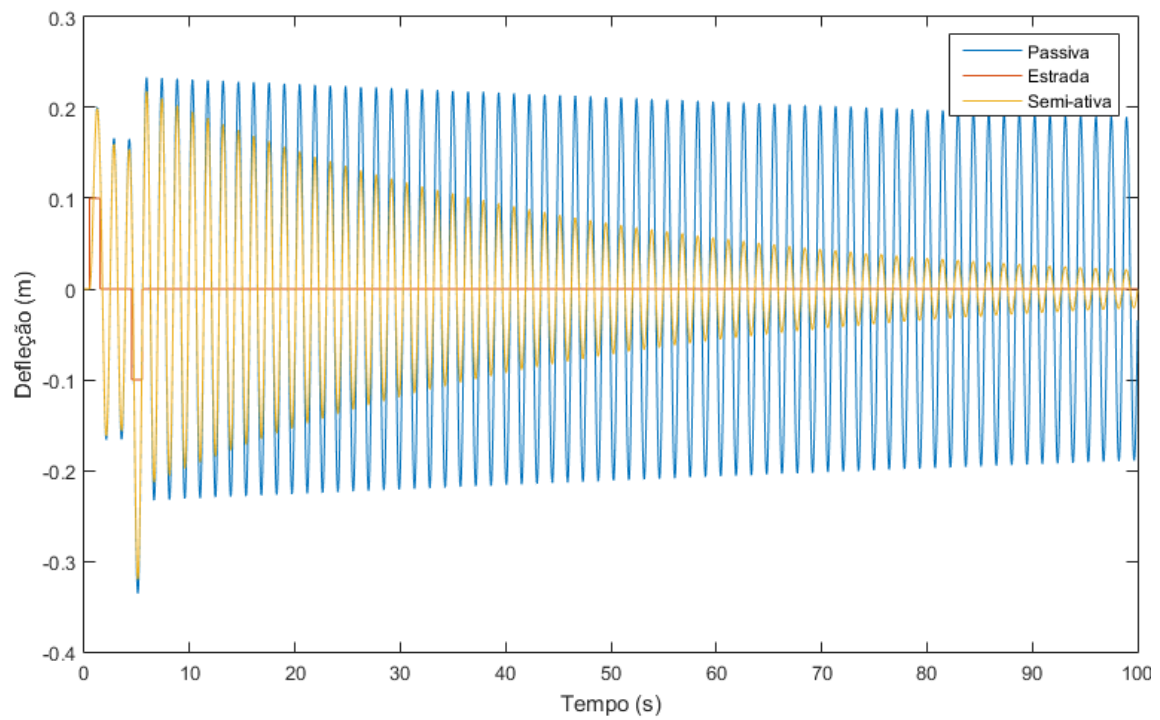


Figura 96 - Suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa para a roda frontal esquerda de um carro completo

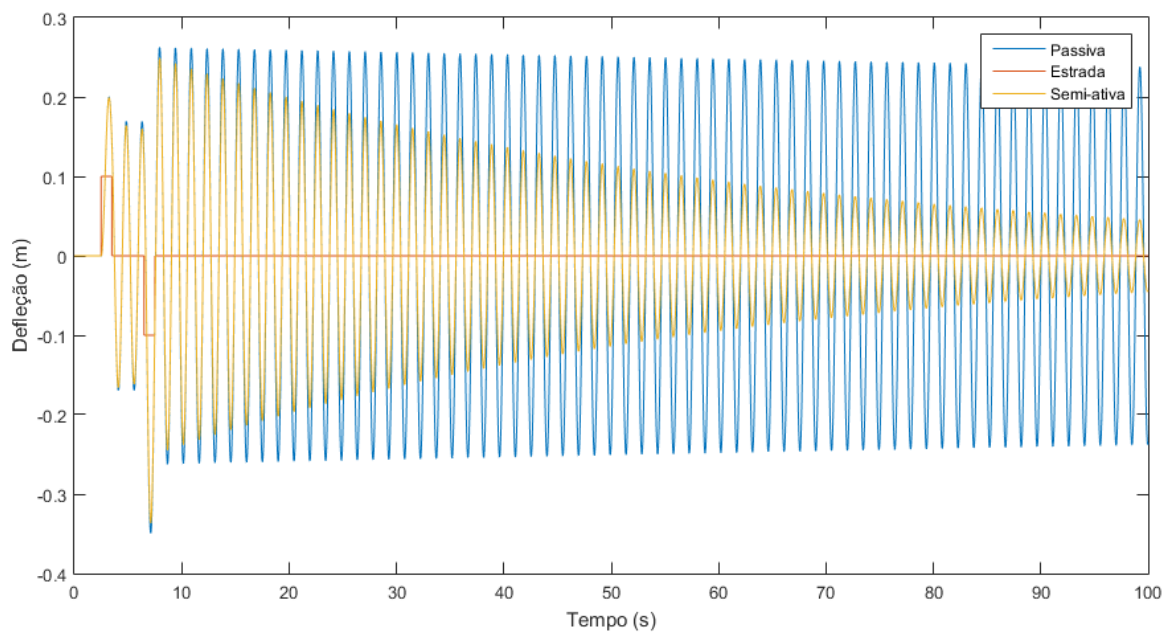


Figura 97 - Suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa para a roda traseira direita de um carro completo

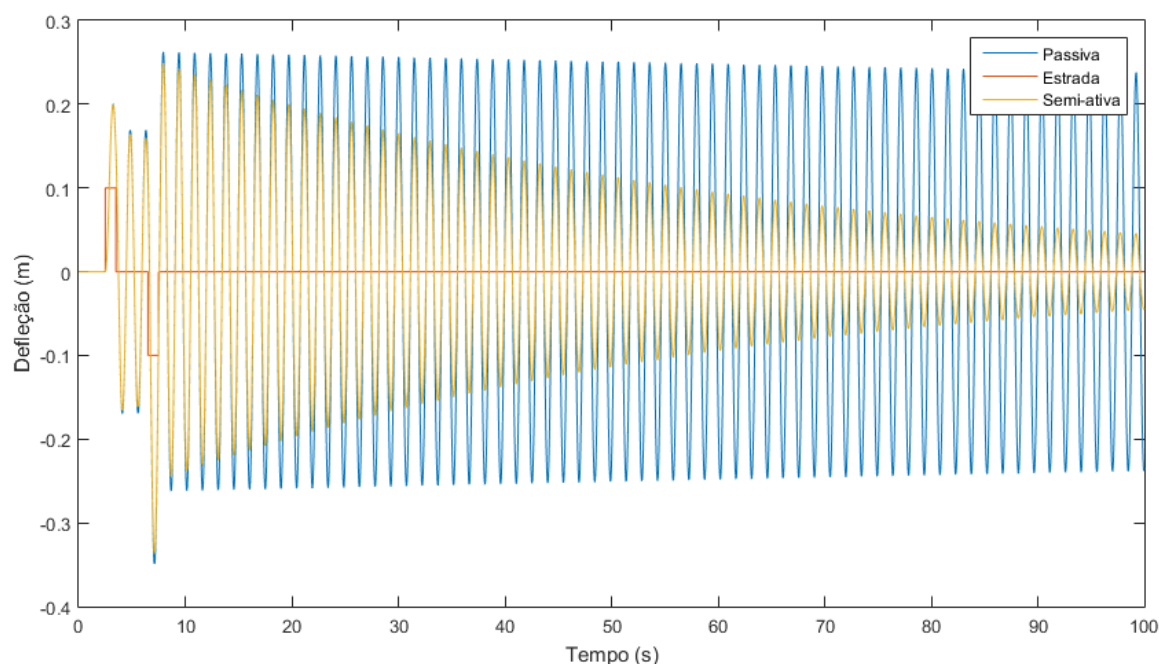


Figura 98 - Suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa para a roda traseira esquerda de um carro completo

As figuras 95, 96, 97 e 98 apresentam os resultados obtidos para a deflexão de cada uma das rodas para o modelo de carro completo semi-ativo. A curva a azul volta a representar a suspensão passiva, que para este modelo é bastante instável quando se pensa na função principal de uma suspensão. A suspensão semi-ativa desenvolvida para este modelo não apresenta o melhor comportamento desejado, uma vez que não consegue reduzir muito a deflexão da massa suspensa, no entanto consegue reduzir bastante o tempo de estabelecimento e fazer com que a massa suspensa regresse mais facilmente ao seu estado de repouso. Não existem grandes diferenças entre as duas rodas frontais ou entre as duas rodas traseiras do veículo, uma vez que estas tem a necessidade de ser pares idênticos.

O modelo de carro completo permite, como referido anteriormente, analisar tanto o *pitch* como o *roll* do veículo. Estes dois parâmetros são características importantes a controlar para reduzir o desconforto dentro da cabine do veículo. As figuras 99 e 100 apresentam os resultados obtidos para estes dois parâmetros.

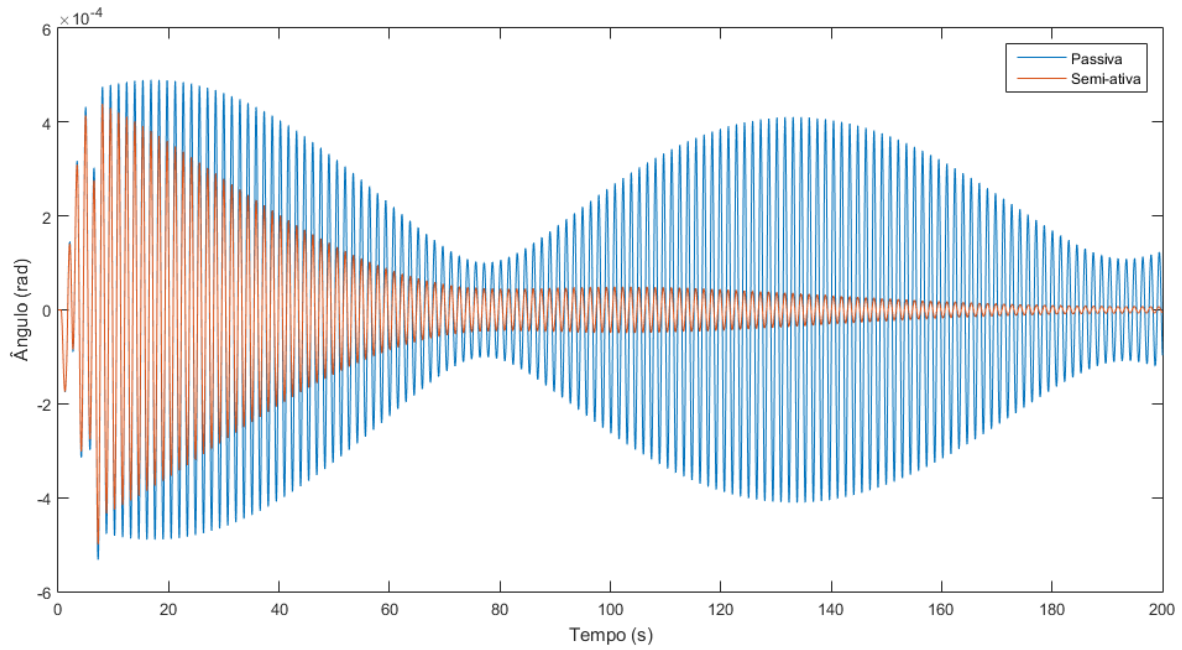


Figura 99 - Comparação do *pitch* para a suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa de um carro completo

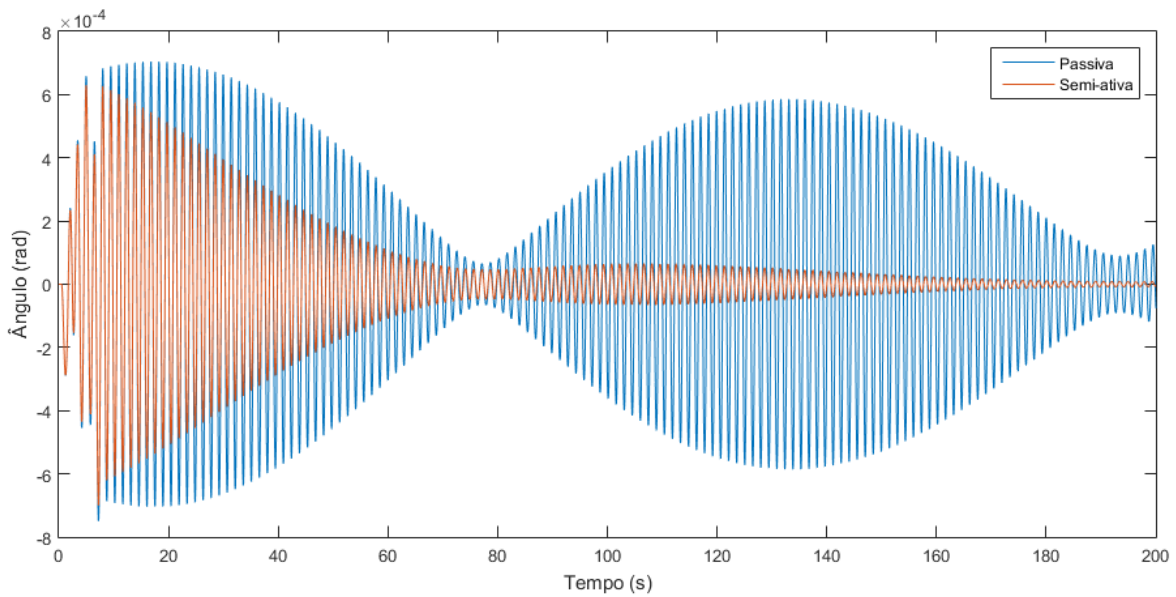


Figura 100 - Comparação do *roll* para a suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa de um carro completo

Quando analisamos os resultados obtidos, verificamos que a suspensão passiva (curva azul), apresenta um desempenho bastante pobre, uma vez que apresenta harmônicos o que no caso de estarem presentes em maior quantidade poderiam provocar grandes desconfortos e danos na cabine do veículo. A suspensão semi-ativa (curva vermelha) consegue corrigir o problema dos harmônicos da suspensão passiva, e consegue também reduzir o tempo de

estabelecimento apesar de os seus valores iniciais serem próximos dos obtidos na suspensão passiva. Importa destacar, que os melhoramentos de desempenho destes dois parâmetros é uma consequência do controlo de cada roda existente no modelo.

Simulando agora o modelo relativo á suspensão ativa, utilizando os mesmos dados do veículo e procedendo da mesma forma, obteve-se os seguintes resultados para a deflexão da massa suspensa em cada roda. As Figuras 101, 102, 103 e 104 apresentam estes resultados.

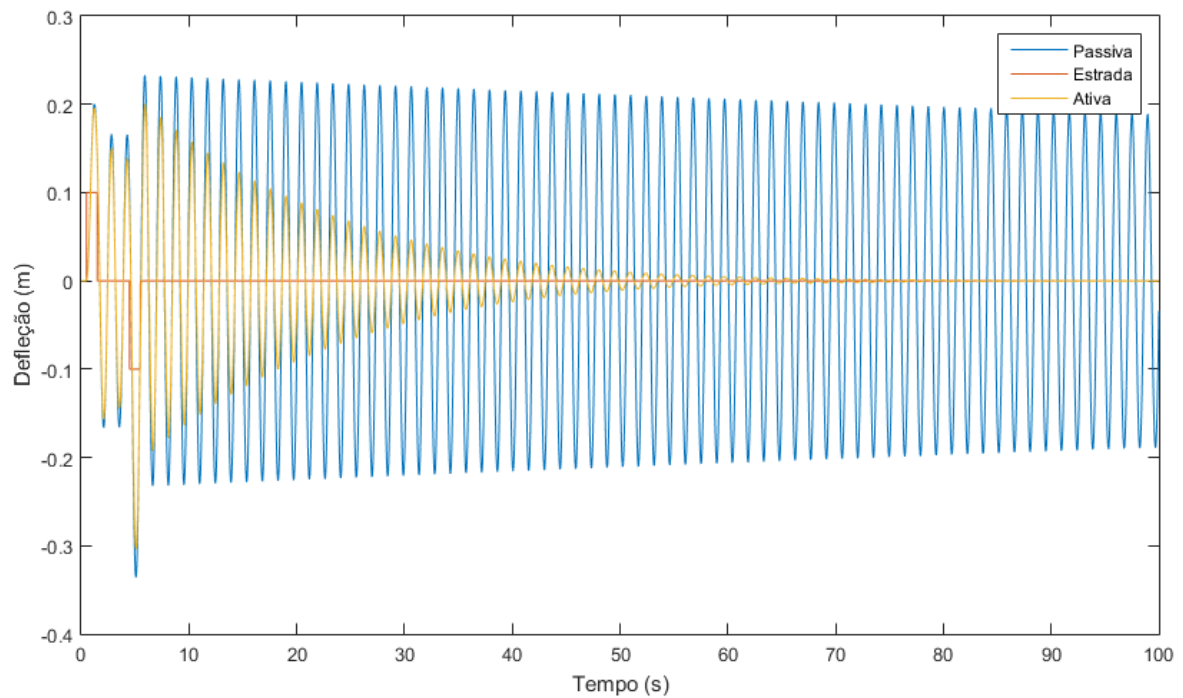


Figura 101 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para a roda frontal direita de um carro completo

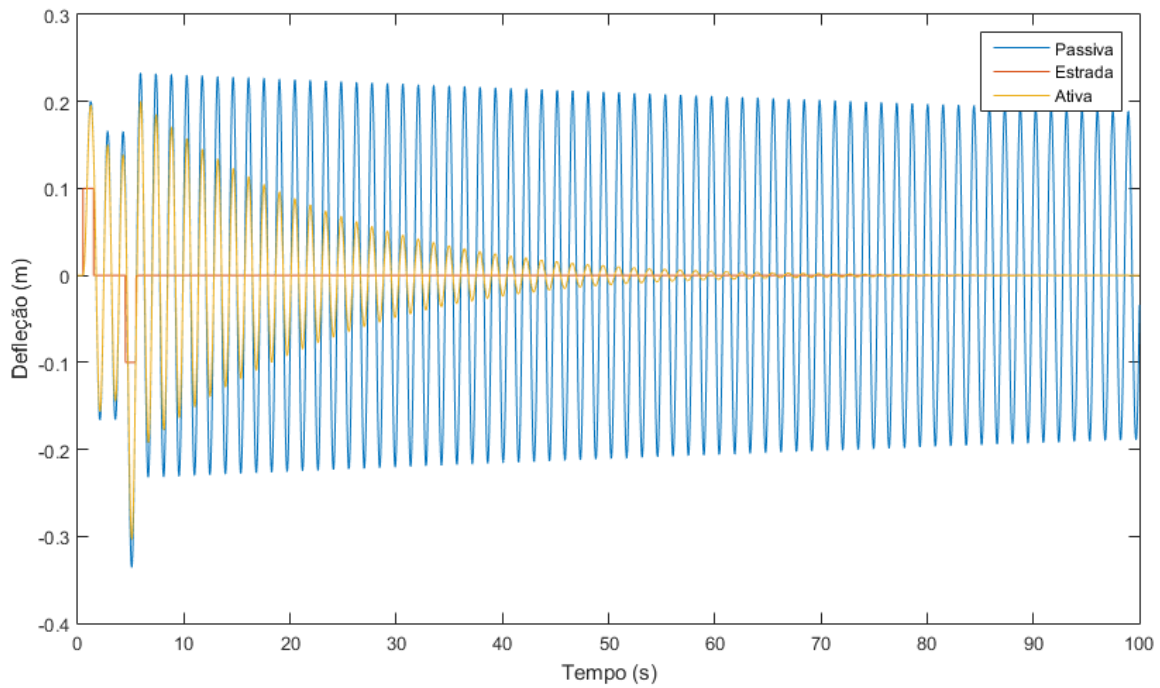


Figura 102 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para a roda frontal esquerda de um carro completo

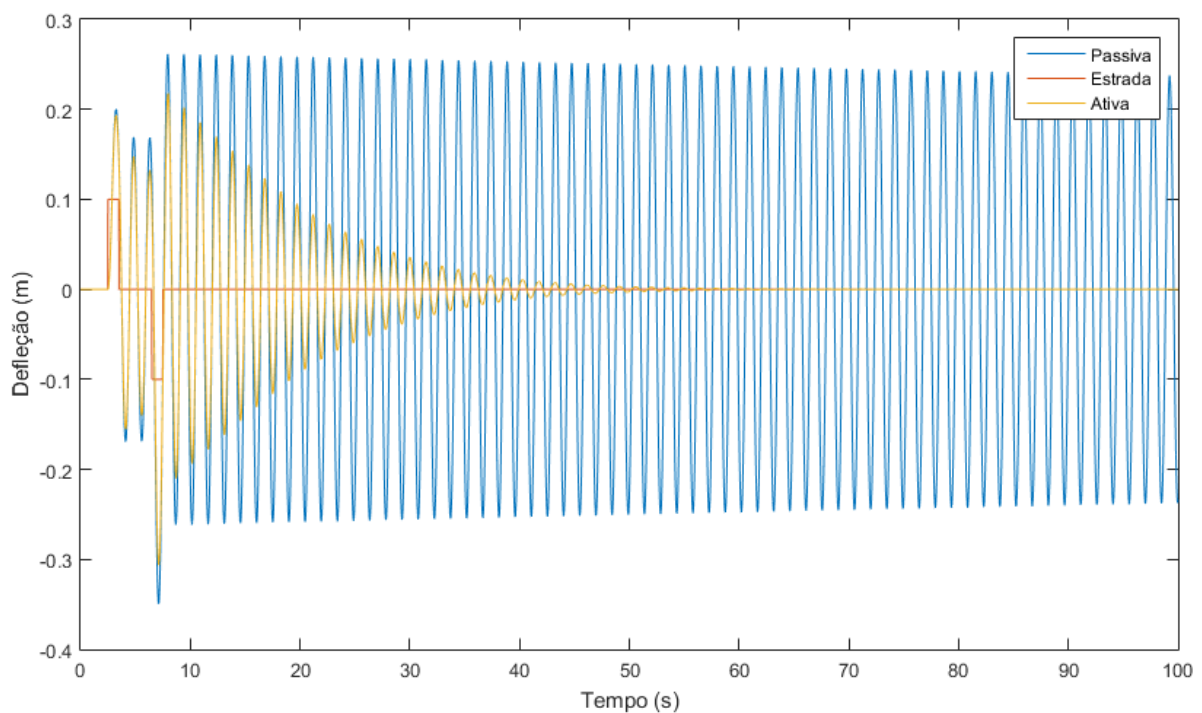


Figura 103 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para a roda traseira direita de um carro completo

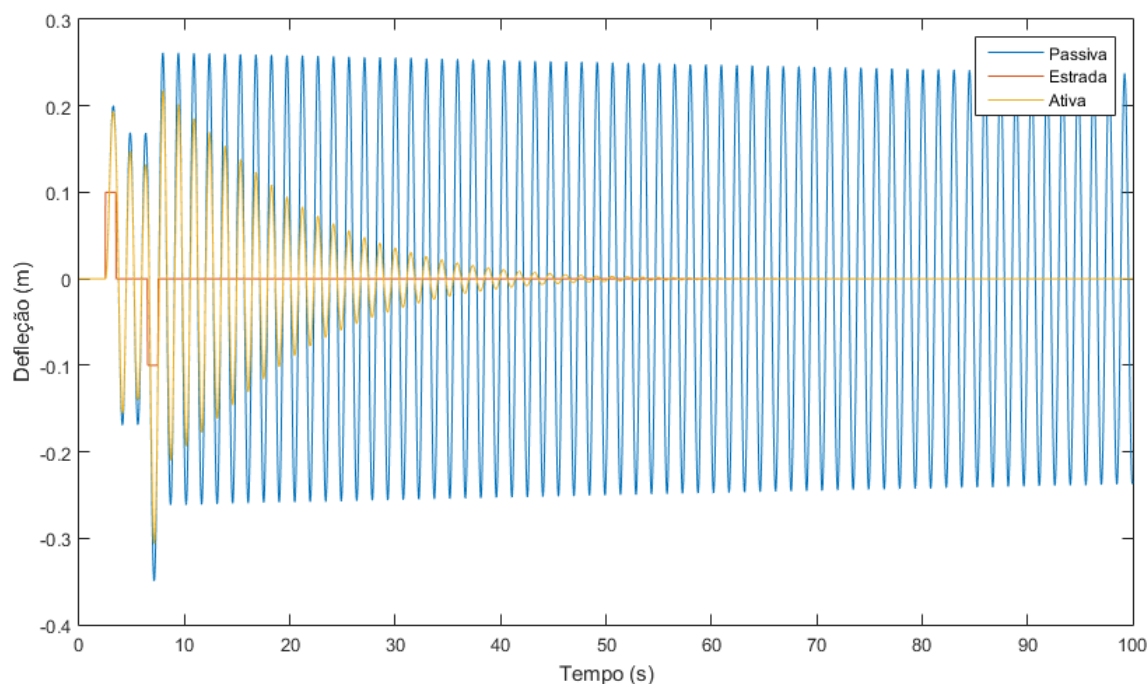


Figura 104 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para a roda traseira esquerda de um carro completo

Analisando os resultados obtidos podemos observar que a suspensão ativa consegue superar a suspensão semi-ativa, apresentado um tempo de estabelecimento mais curto, sem aumentar os valores da deflexão acima dos obtidos pela suspensão passiva. Neste caso em particular, a suspensão ativa ganha vantagem sobre a suspensão semi-ativa.

Quanto aos resultados relativos ao *pitch* e ao *roll*, é de esperar que estes também apresentem melhorias face ao modelo semi-ativo equivalente, uma vez que estes dois parâmetros sofrem de uma influência direta do bom ou do mau controlo de cada roda. As figuras 105 e 106 apresentam os resultados destes dois parâmetros.

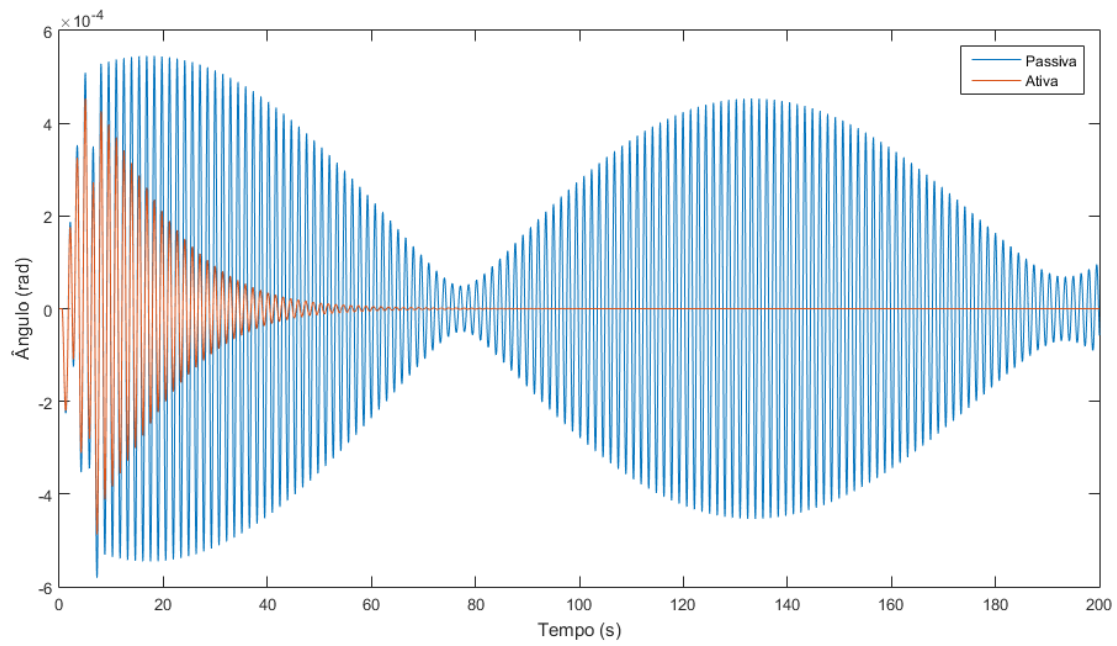


Figura 105 - Comparação do *pitch* para a suspensão passiva *versus* suspensão ativa de um carro completo

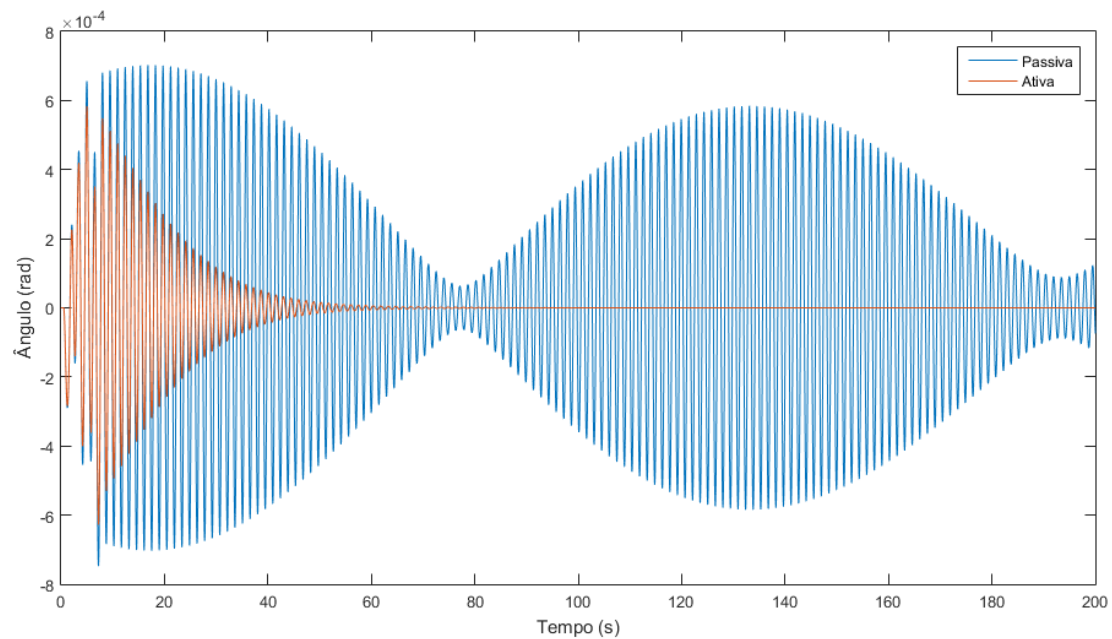


Figura 106 - Comparação do *roll* para a suspensão passiva *versus* suspensão ativa de um carro completo

Como seria de esperar, existe um aumento do desempenho do sistema ao nível do *pitch* e do *roll* resultante da melhoria de desempenho geral do sistema. Em ambos os casos, as

inclinações a que a cabine está sujeita são reduzidas em pouco, mas o tempo de estabelecimento é reduzido de forma bastante significativa.

6.4. TESTES ADICIONAIS

Depois de terem sido efetuados os testes iniciais, onde foram utilizados dados de veículos mais comuns de forma a validar todos os modelos desenvolvidos, achou-se interessante utilizar os modelos desenvolvidos e introduzir valores relativos a outros tipos de veículos com diferentes características e alterar o perfil de estrada de forma a dar continuação ao estudo.

Nas seguintes subsecções irão ser apresentados alguns desses testes adicionais, onde irão ser alterados inicialmente, o veículo em análise e de seguida o perfil da estrada. Em ambos os casos, considerou-se a suspensão ativa por ser esta a que revelou melhor desempenho para o veículo que vai ser utilizado.

6.4.1 Suspensão ativa para um quarto de autocarro

Durante a pesquisa para obtenção dos valores para os parâmetros da suspensão dos veículos, foram encontrados valores referentes aos parâmetros para a suspensão de um quarto de autocarro. Estes valores estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Dados do veículo para um quarto de autocarro [Bus_parameters]

$b_1 = 350 \text{ Ns/m}$	$m_1 = 2500 \text{ Kg}$
$k_1 = 80000 \text{ N/m}$	$m_2 = 320 \text{ Kg}$
$k_2 = 500000 \text{ N/m}$	

Utilizando o modelo e o controlador desenvolvidos para a suspensão ativa para um quarto de carro obteve-se o seguinte resultado.

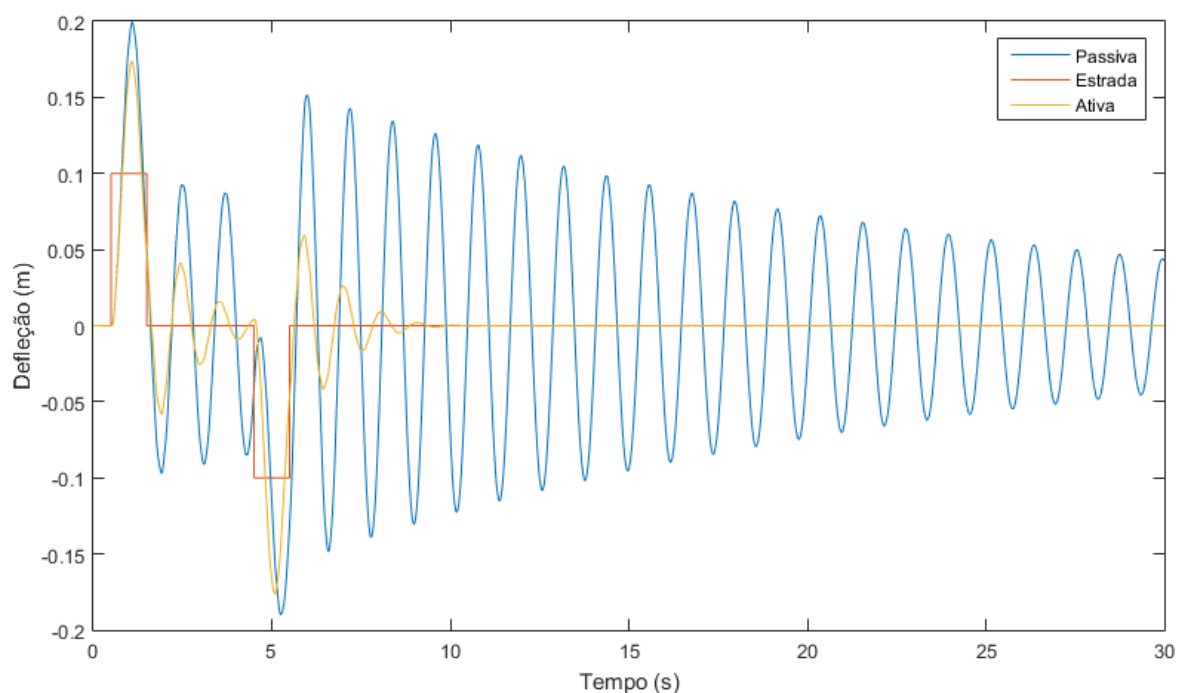


Figura 107 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para um quarto de autocarro

Como é possível observar na Figura 107, o controlo difuso utilizado consegue apresentar um bom desempenho mesmo quando se trata de um veículo de dimensão e peso muito superiores. Consegue-se verificar que a suspensão ativa (curva amarela) revela uma redução grande na deflexão e no tempo de estabelecimento da massa suspensa.

6.4.2 Suspensão ativa para um novo veículo completo

Outro teste adicional passou por utilizar outro conjunto de dados para o veículo. Este novo veículo é diferente do utilizado durante os testes iniciais, e apresenta valores mais equilibrados e dimensões um pouco mais reduzidas o que pode indicar que este veículo é de uma gama superior (uma vez que as fontes de onde foram recolhidos os dados não especificam modelos). A Tabela 16 apresenta os dados utilizados.

Tabela 16 - Dados do veículo para um carro completo [Mitra]

$c_f = 4000 \text{ Ns/m}$	$k_{tr} = 30000 \text{ N/m}$	$l_2 = 1 \text{ m}$
$c_r = 1000 \text{ Ns/m}$	$m_s = 1200 \text{ Kg}$	$w_f = 1 \text{ m}$
$k_f = 55000 \text{ N/m}$	$m_{uf} = 60 \text{ Kg}$	$w_r = 1 \text{ m}$
$k_r = 25000 \text{ N/m}$	$m_{ur} = 60 \text{ Kg}$	$I_p = 4000 \text{ Kg. m}^2$
$k_{tf} = 30000 \text{ N/m}$	$l_1 = 1,5 \text{ m}$	$I_r = 950 \text{ Kg. m}^2$

Simulando o modelo de carro completo, com suspensão ativa, com estes novos valores, obtemos os seguintes resultados.

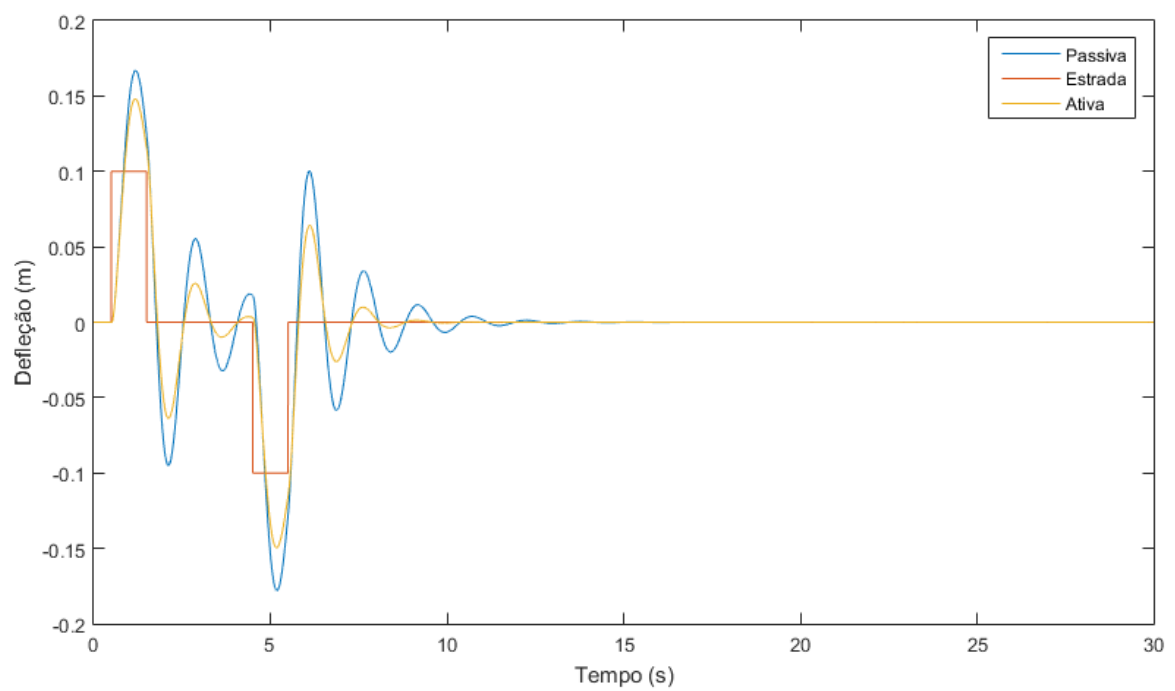


Figura 108 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para a roda frontal direita de um carro completo

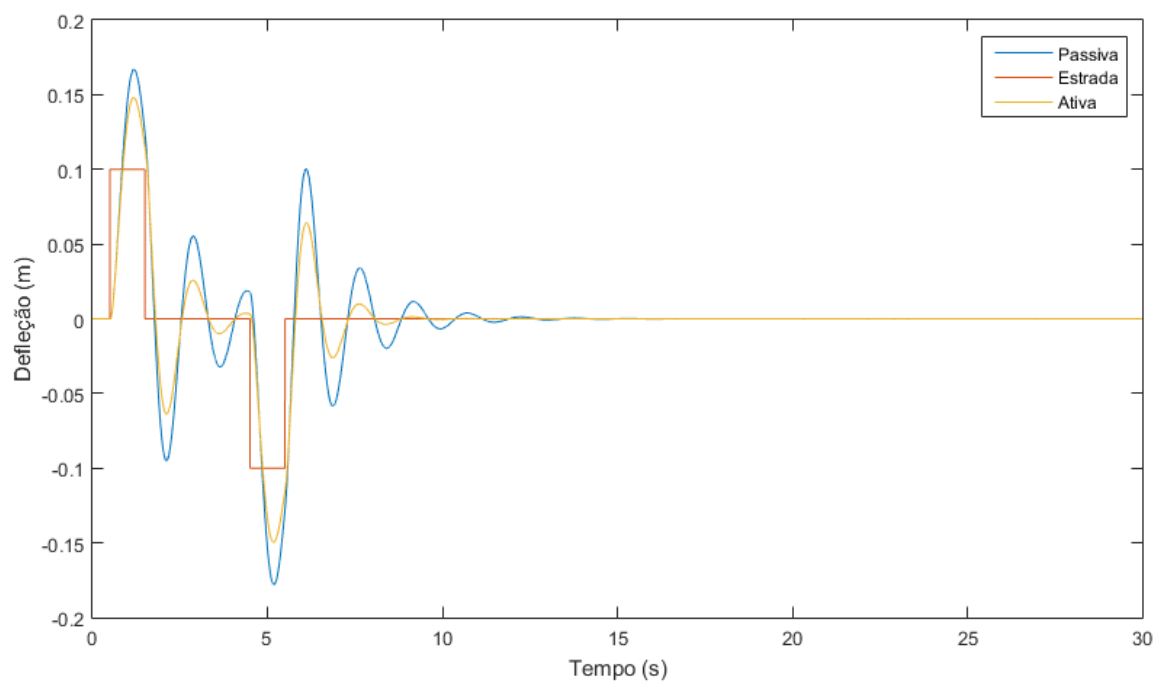


Figura 109 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para a roda frontal esquerda de um carro completo

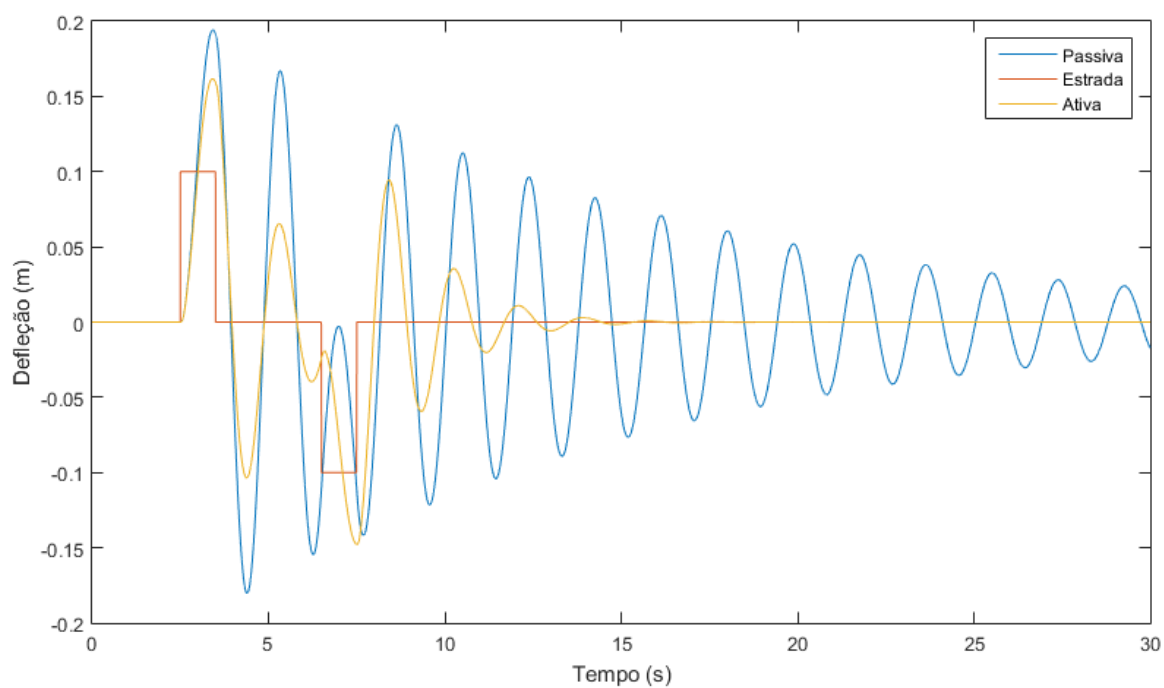


Figura 110 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para a roda traseira direita de um carro completo

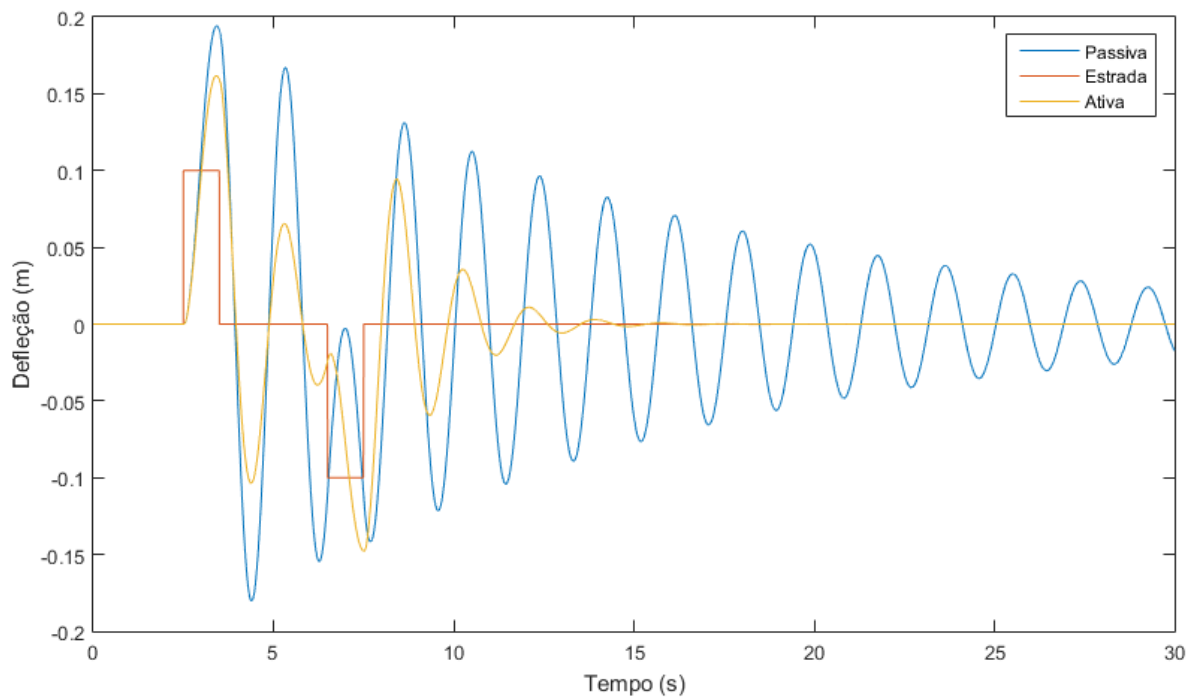


Figura 111 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para a roda traseira esquerda de um carro completo

Através das figuras 108, 109, 110 e 111 é possível observar os resultados obtidos para a deflexão da massa suspensa, onde são visíveis grandes melhorias da suspensão ativa face à suspensão passiva. Se compararmos estes resultados com os obtidos durante os testes do mesmo modelo de carro completo com suspensão ativa mas com os dados do veículo anterior podemos verificar que este novo veículo apresenta características melhores.

As figuras 112 e 113 mostram os resultados obtidos para o *pitch* e para o *roll* para estes novos dados de veículo.

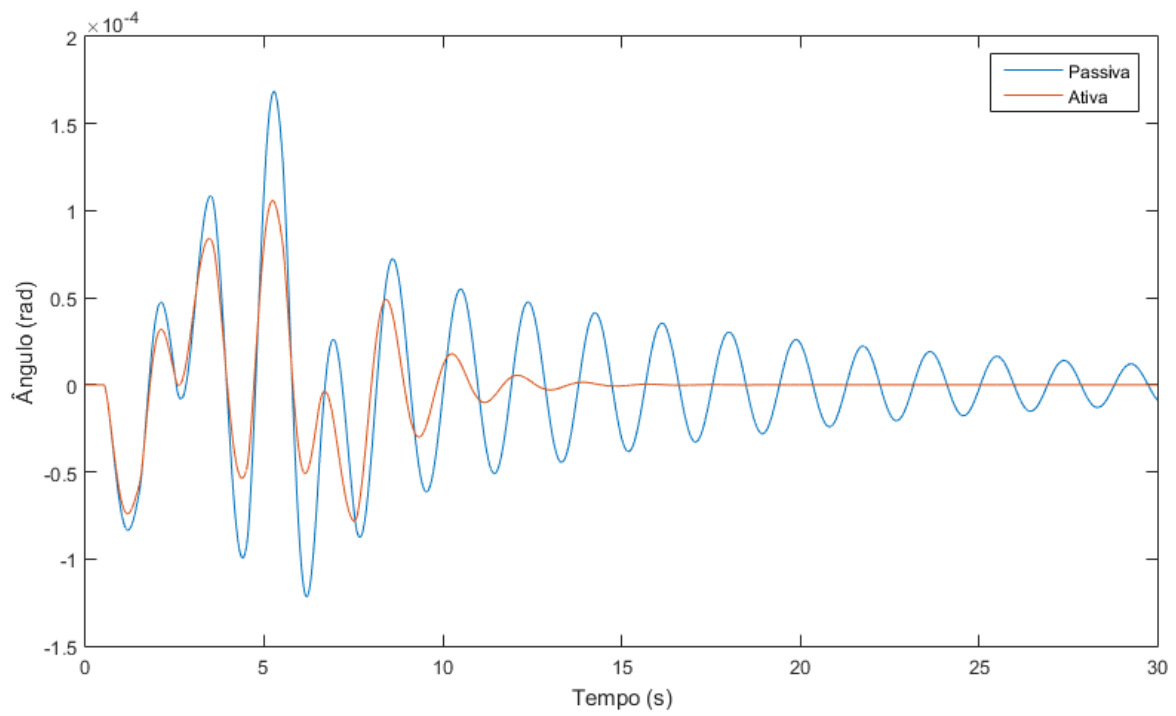


Figura 112 - Comparação do *pitch* para suspensão passiva *versus* suspensão ativa de um carro completo

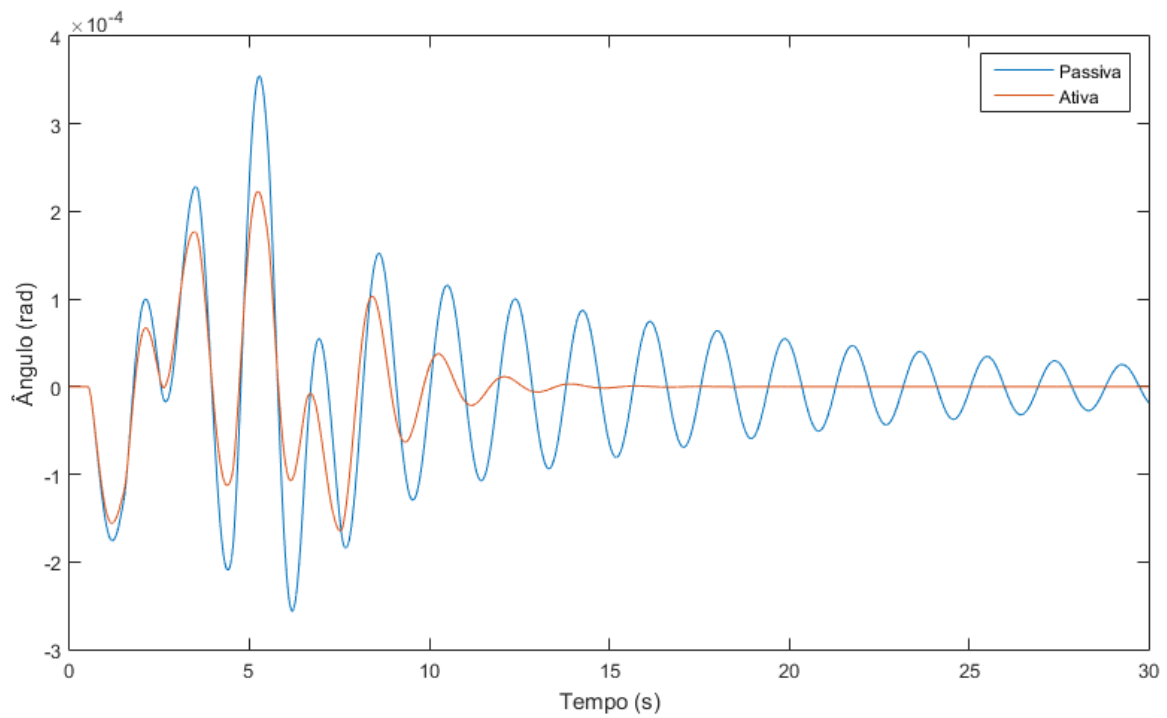


Figura 113 - Comparação do *roll* para suspensão passiva *versus* suspensão ativa de um carro completo

Como é possível verificar pelos resultados obtidos para estes dois parâmetros, existe uma grande melhoria do desempenho uma vez que existe uma redução nos ângulos apresentados pela massa suspensa e um grande decréscimo no tempo de estabelecimento.

6.4.3 Novo perfil de estrada

Para os primeiros testes dos modelos desenvolvidos foi utilizado um simples perfil de estrada constituído apenas por uma lomba e uma depressão, o qual permitiu analisar de forma simples os resultados obtidos, de forma a validar o bom funcionamento das diferentes suspensões.

Como teste adicional, foi definido um novo perfil de estrada que apresenta deformidades adicionais que pretendem colocar a suspensão sobre maior trabalho, e assim verificar se o bom funcionamento das suspensões desenvolvidas se mantem. A Figura 114 apresenta este novo perfil para a estrada.

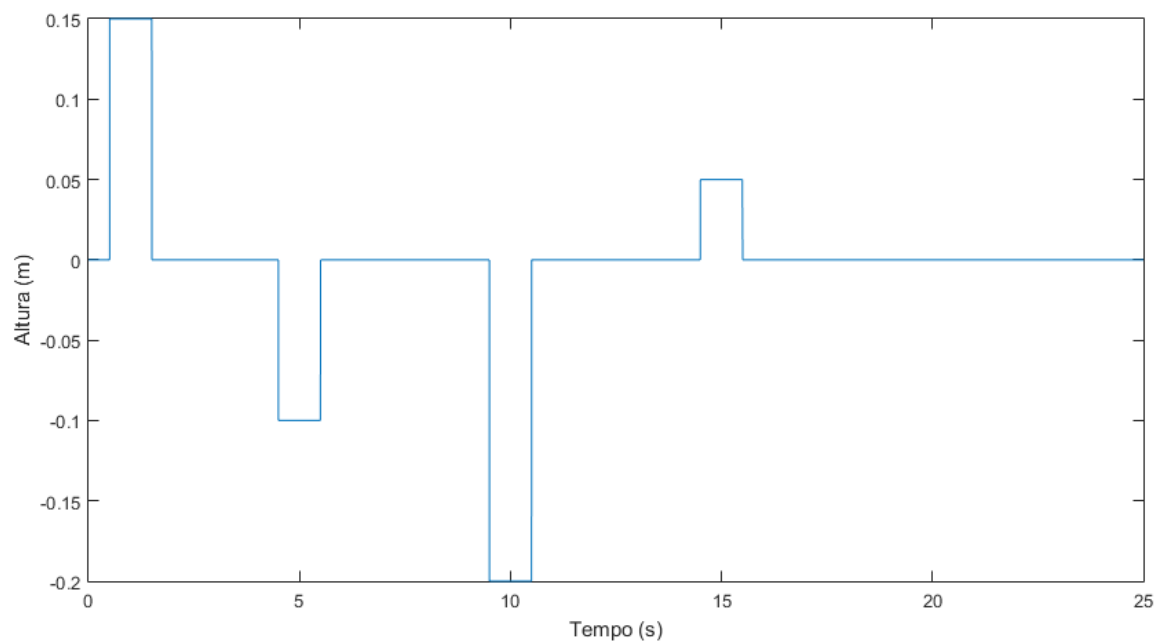


Figura 114 – Novo perfil de estrada

Para este teste foram utilizadas as suspensões semi-ativas e ativas para meio carro, uma vez que os resultados obtidos inicialmente para estas suspensões foram bons e mais simples de analisar, face aos de um carro completo onde existe demasiadas oscilações as quais tornam os resultados mais difíceis de analisar. Os dados do veículo utilizado são os presentes na Tabela 13.

6.4.3.1 Suspensão semi-ativa

Mais uma vez, utilizando o modelo desenvolvido para a suspensão semi-ativa para meio carro mas com o novo perfil de estrada obtiveram-se os seguintes resultados para a deflexão da massa suspensa.

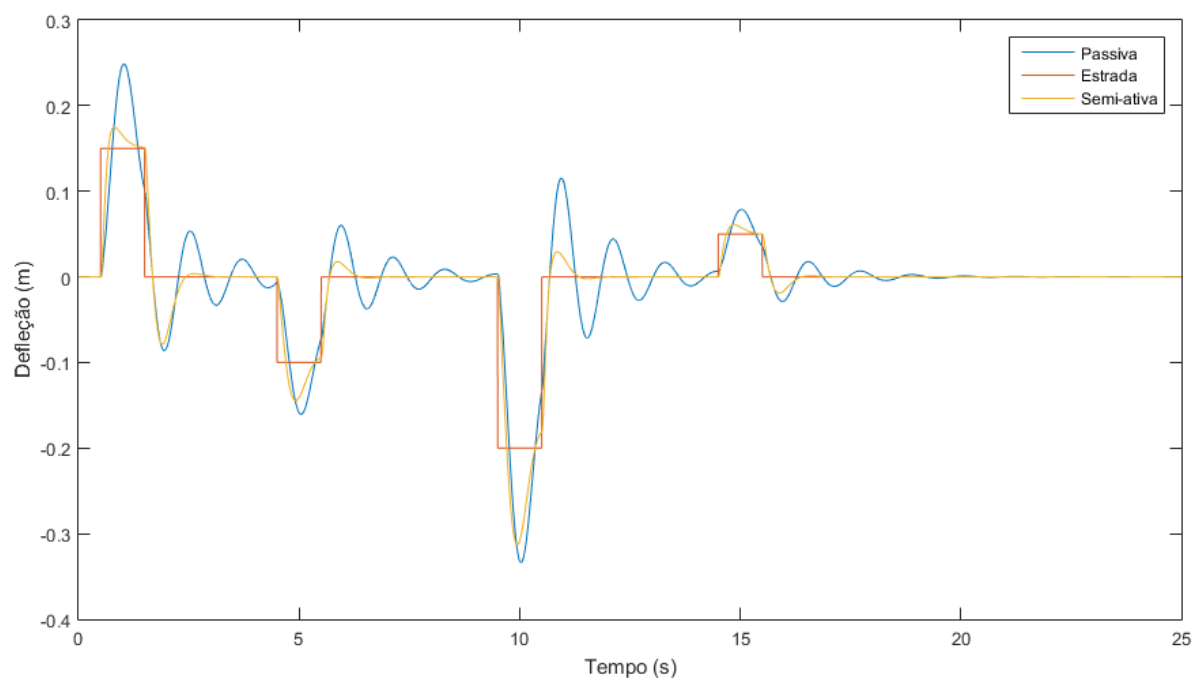


Figura 115 - Suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa para a o lado frontal de um meio carro

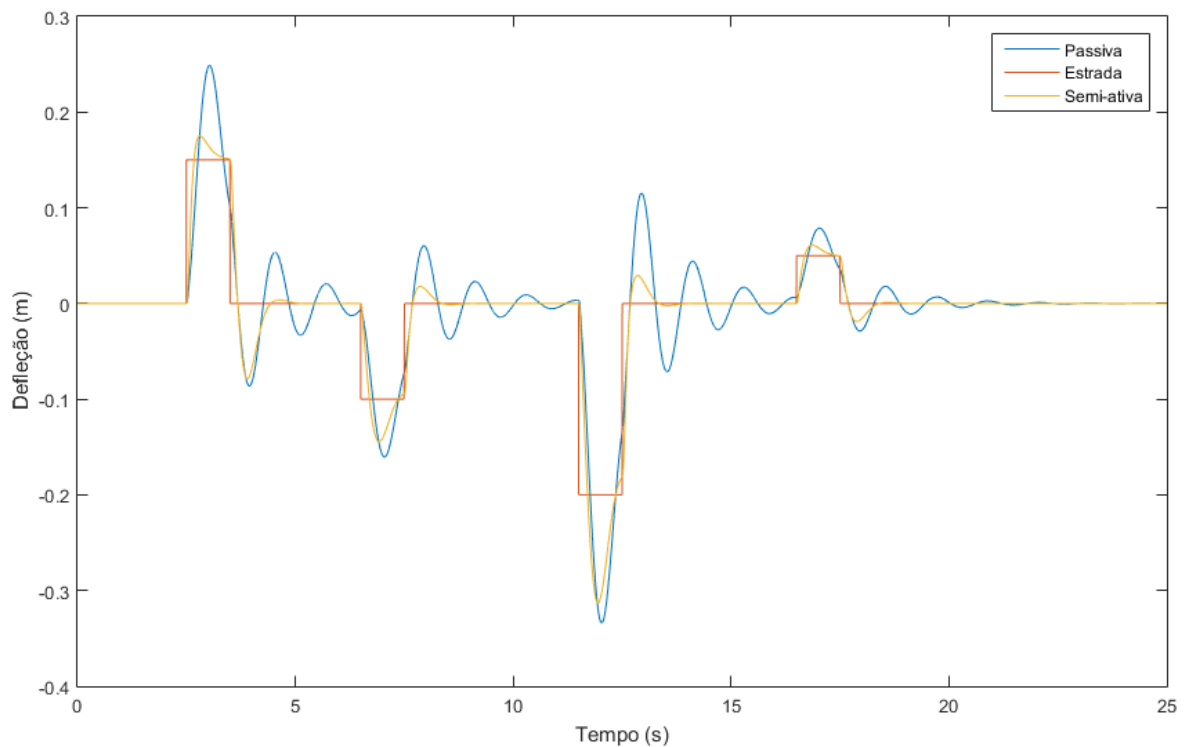


Figura 116 - Suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa para a o lado traseiro de um meio carro

Como é possível verificar através das figuras 115 e 116, a suspensão semi-ativa reage de forma positiva ao novo perfil de estrada a que foi sujeita, uma vez que ela consegue estabilizar quando submetida a sucessivas deformações na estrada sem entrar em instabilidade que é um dos casos a evitar a todo o custo. Uma vez que estamos a utilizar o modelo para meio carro é interessante verificar qual o resultado obtido para o *pitch*. Este resultado pode ser observado na Figura 117.

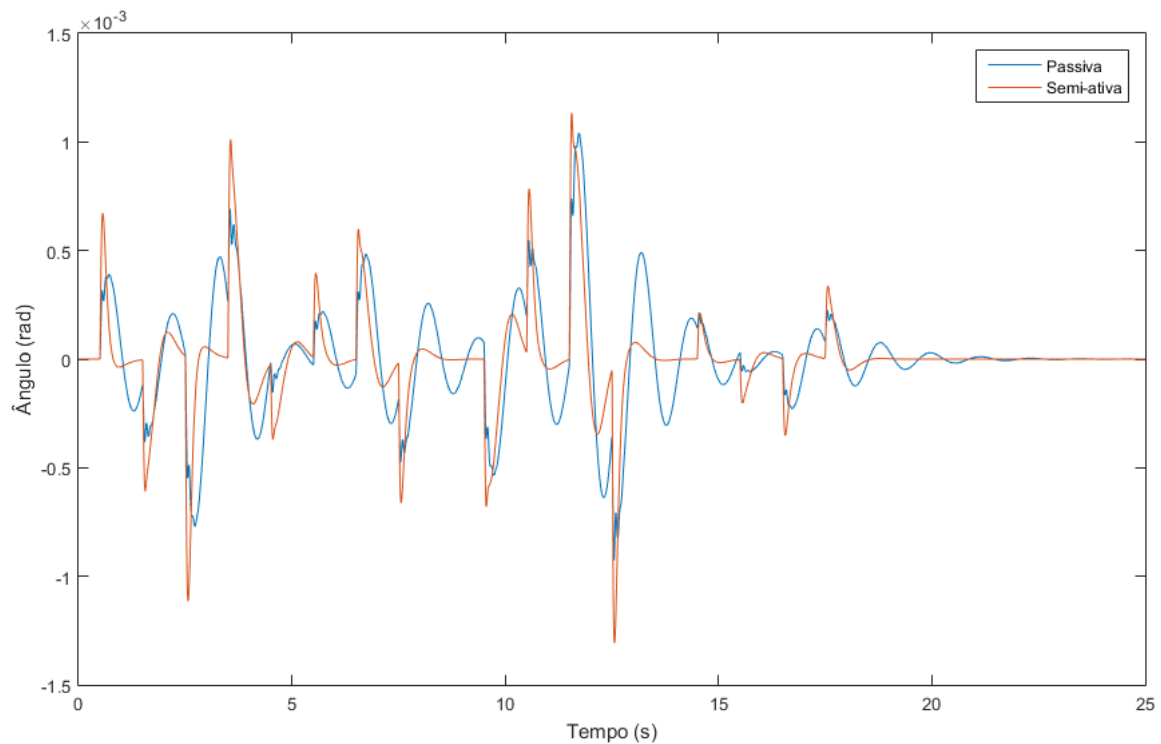


Figura 117 - Comparação do *pitch* para a suspensão passiva *versus* suspensão semi-ativa de meio carro

Como é possível observar, apesar de o resultado apresentado pela suspensão semi-ativa ser melhor que o apresentado pela suspensão passiva, em alguns instantes de tempo, este apresenta menos oscilações e estabiliza mais depressa do que a suspensão passiva.

6.4.3.2 Suspensão totalmente ativa

Depois de aplicado o novo perfil de estrada à suspensão semi-ativa, passamos agora para o modelo de suspensão ativa. Assim iremos verificar de que forma a suspensão ativa se comporta quando submetida a este novo perfil de estrada, podendo-se de seguida compará-lo ao modelo de suspensão semi-ativa. As figuras 118 e 119 apresentam os resultados obtidos depois de simulado o modelo ativo.

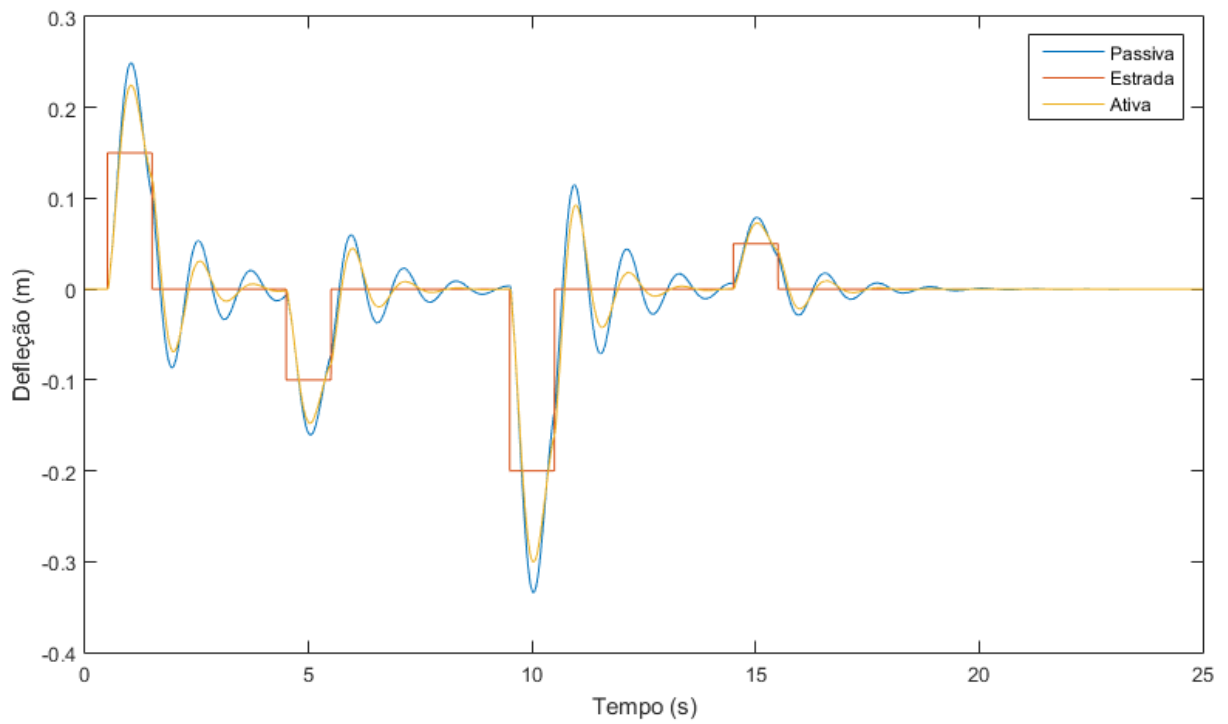


Figura 118 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para a o lado frontal de um meio carro

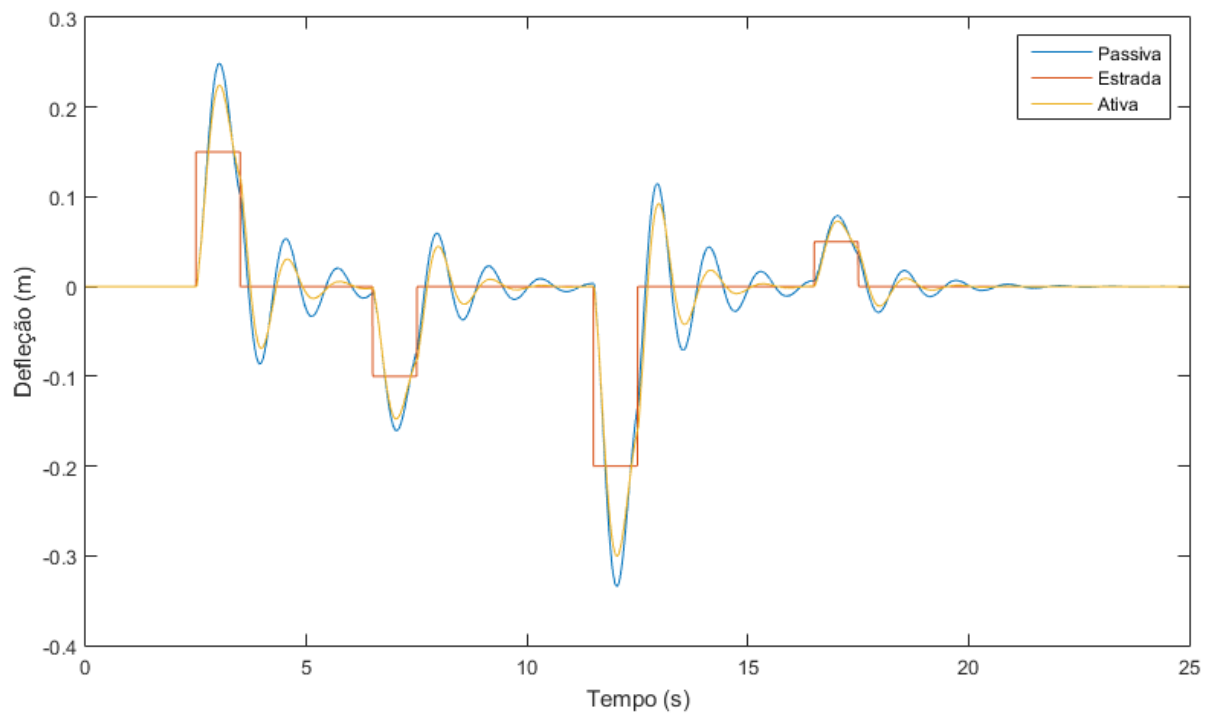


Figura 119 - Suspensão passiva *versus* suspensão ativa para a o lado traseiro de um meio carro

Através de uma análise das figuras, é possível verificar que apesar dos resultados serem mais fracos que os obtidos pela suspensão semi-ativa ao nível da deflexão, a suspensão ativa reage

bem à passagem pelas sucessivas deformidades existentes no novo perfil de estrada, conseguindo estabilizar a massa suspensa, evitando por isso, estados onde existe instabilidade.

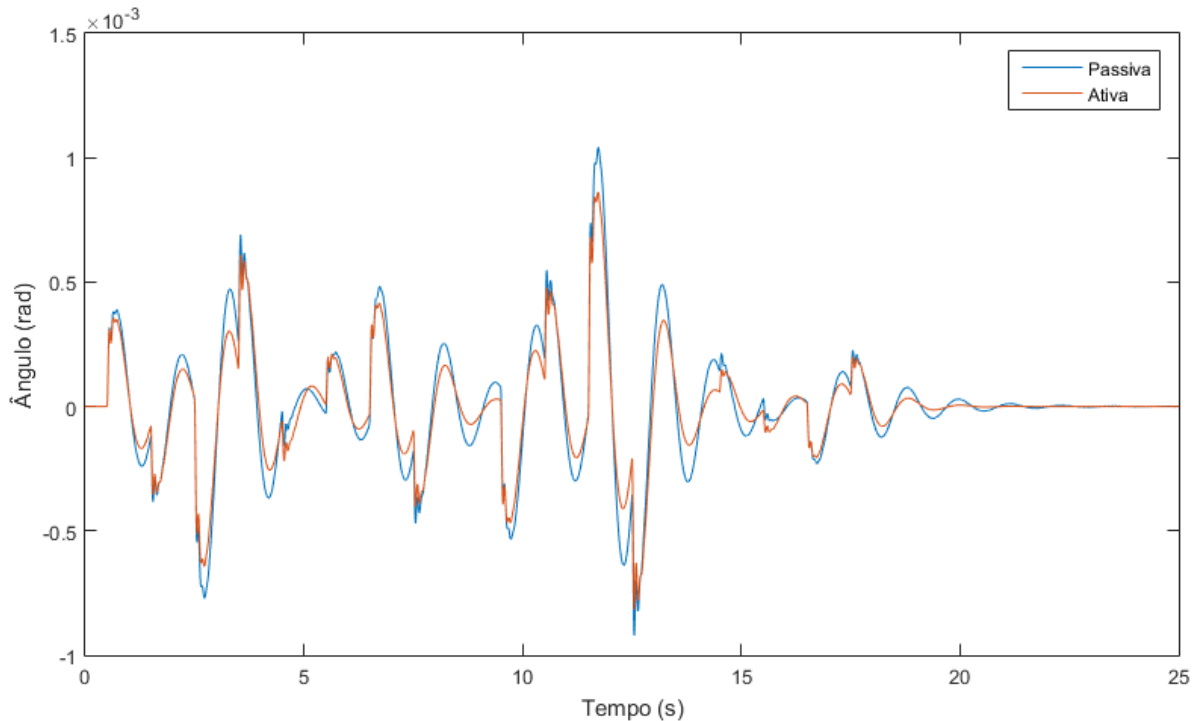


Figura 120 - Comparação do *pitch* para a suspensão passiva *versus* suspensão totalmente ativa de meio carro (novo perfil de estrada)

Na Figura 120 é possível observar o resultado obtido para o *pitch* para este novo perfil de estrada. O *pitch* para o modelo ativo é melhor do que o presente no modelo semi-ativo, uma vez que se mantém sempre abaixo dos valores da suspensão passiva e consegue também reduzir o tempo de estabelecimento da massa suspensa, fazendo-a retornar mais depressa ao seu estado de repouso.

6.5. CONCLUSÕES PRELIMINARES

Antes de avançar para as conclusões sobre a totalidade do estudo desenvolvido, é importante retirar algumas conclusões referentes a todos os testes efetuados, de forma a condensar e resumir toda a informação obtida durante este capítulo.

Os primeiros teste efetuados aos três tipos de modelos de suspensão, quarto de carro, meio carro e carro completo, para os dois tipos de suspensões estudadas, semi-ativa e ativa, serviram para verificar se os modelos se encontravam definidos de forma correta e se os controladores desenvolvidos estavam a funcionar de forma correta. Depois de realizados todos os testes iniciais aos diferentes modelos foi possível validar o seu correto funcionamento, obtendo-se uma diversidade de resultados. Em alguns casos a surpresa foi o facto de a suspensão semi-ativa que se toma por uma tecnologia inferior à das suspensões ativas, apresentar resultados melhores ao nível da deflexão e como consequência ao nível do *pitch* e do *roll*. Mas existe um caso em particular, o modelo de um carro completo, onde a suspensão ativa apresenta resultados superiores.

Depois de validados os modelos desenvolvidos, e de forma a dar continuidade ao estudo, foram realizados alguns testes adicionais que permitiram testar os modelos em condições diferentes (modelos de veículos diferentes e perfil de estrada diferente). Alterando os dados do veículo do modelo, permitiu analisar de que forma diferentes veículos, neste caso um autocarro e um veículo de gama superior, reagem quando a suspensão é alterada de passiva para ativa. Alterando o perfil da estrada a que as suspensões são submetidas foi nos possível analisar, se quando submetidas a um numero superior de irregularidades, se as suspensões conseguiam manter a estabilidade, evitando situações como a criação de harmónicos que podem causar danos na suspensão do veículo.

7. CONCLUSÕES

As suspensões existentes nos automóveis são um dos elementos que confere uma maior segurança ao veículo e aos seus ocupantes, e dessa forma, desde a existência dos primeiros automóveis que a tendência é para melhorar cada vez mais o seu desempenho.

O estudo desenvolvido pretendia estudar qual o impacto de suspensões controladas por controladores difusos face às suspensões passivas existentes, de forma a verificar se as suspensões controladas por meios computadorizados são melhores e se conferem melhor segurança e conforto aos ocupantes, e para diferentes veículos.

De modo a fazer um estudo mais completo foram estudados três tipos de modelos, um quarto de carro, meio carro e um carro completo, cada um com complexidade incremental e onde é possível observar todos os valores que validam os objetivos traçados. Através dos diferentes testes realizados foi possível verificar o bom funcionamento de todos os modelos desenvolvidos. Existiram surpresas em alguns resultados, devido á falta de uniformidade dos dados para veículos encontrados, uma vez não foram encontrados dados de veículos específicos que permitissem utilizar sempre o mesmo veículo para todos os testes.

De facto, verificou-se que os parâmetros necessários para os diferentes modelos, não são fáceis de se obter, daí que tenha havido limitações quando da escolha dos veículos. Para além disso, em toda a documentação que serviu de base a este estudo, não constam gráficos

que nos permitam comparar os resultados obtidos por nós com os obtidos pelos autores desses artigos. Assim, as conclusões retiradas dos resultados obtidos tiveram por base o senso comum, e alguns aspetos teóricos.

Visto terem sido atingidos todos os objetivos propostos inicialmente, este estudo veio demonstrar a capacidade e viabilidade dos controladores difusos quando aplicados em suspensões de automóveis.

7.1. PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com o objetivo de melhor se avaliar os métodos aqui apresentados, seria interessante fazer algumas melhorias nos algoritmos, nomeadamente fazer mais ajustes em termos dos intervalos das variáveis dos sistemas, bem como nas regras difusas dos controladores.

Um outro objetivo, seria aplicar os algoritmos desenvolvidos, a carros reais, de várias marcas e de vários modelos, visando assim validar todo o estudo apresentado nesta dissertação.

Referências Documentais

- [500sec] <http://500sec.com/abc-active-body-control-mbc-magic-body-control/>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [Alhanjouri] Mohammed Alhanjouri, Ahmed A. Alhaddad, “Optimize Wash Time of Washing Machine Using Fuzzy Logic”
- [Antunović] Mladen Antunović, Hrvoje Glavaš, “Fuzzy Logic Approach for Traffic Signals Control of an Isolated Intersection”
- [bimmerfest] <http://www.bimmerfest.com/forums/showthread.php?t=696585>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [bose] http://www.bose.com/controller?url=/automotive/bose_suspension/index.jsp; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [Bus_parameters] <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Suspension§ion=SystemModeling>; ultima vez consultado a 19 de Junho de 2015
- [carbibles] http://www.carbibles.com/suspension_bible.html; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [cvel] http://www.cvel.clemson.edu/auto/systems/active_suspension.html; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [Darus] Rosheila Darus, Yahaya Md. Sam, “Modeling and Control Active Suspension System for a Full Car Model”, 2009
- [double wishbone] http://en.wikipedia.org/wiki/Double_wishbone_suspension#/media/File:Double_wishbone_suspension.jpg; ultima vez consultado a 19 de Março de 2015
- [ehow] http://www.ehow.com/how-does_5459141_torsion-bar-works.html; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [extremetech] <http://www.extremetech.com/extreme/97177-bose-active-suspension-moves-toward-market>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [FLTool] Mathworks, “Fuzzy Logic Toolbox, User’s Guide”, Março 2015

- [freewtc] <http://www.freewtc.com/products/rear-shocks-absorber-suspension-air-oil-coil-spring-919043-36909.htm>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [gizmag] <http://www.gizmag.com/go/5752/> ; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [Griffin] Anthony Griffin, Bradley Rouse, Philip Woodward, “Active Suspension Systems (powerpoint presentation)”, 2005
- [Hamed] M. Hamed, B. Tesfa, F. Gu, A. D. Ball, “Effects of Tyre Pressure on Vehicle Suspension Performance”, 2014
- [howstuffworks] <http://auto.howstuffworks.com/auto-parts/towing/equipment/accessories/leaf-springs.htm>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [howstuffworks_2] <http://auto.howstuffworks.com/car-suspension1.htm>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [iqsdirectory] <http://blog.iqsdirectory.com/motion-control/coil-springs/>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [johnnymultimedia] <http://stuff.johnnymultimedia.com/SubaruManuals/Bonus%20Material/Car%20Suspension%20Bible/Car%20Suspension%20Bible.pdf>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [K.Craig] Dr. Kevin Craig, “Motivation for the Study of Mechanical System Physical & Mathematical Modeling”, 2014
- [Kampichler, Platen] Kampichler C, Platen R, “Ground beetle occurrence and moor degradation: modelling a bioindication system by automated decision-tree and fuzzy logic”, 2014, Ecological Indicators 4, 99-109
- [Kaur] Arshdeep Kaur, Amrit Kaur, “Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Inference Systems for Air Conditioning Systems”, Maio 2012
- [kfz-tech] <http://www.kfz-tech.de/Verbundlenker-Radaufhaengung.htm>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015

[leaf spring] <http://www.initialdave.com/cars/tech/suspensionbasics03.htm>; ultima vez consultado a 19 de Março de 2015

[maesusp] <http://www.mae.ncsu.edu/klang/course/mae442/Motor%20Sports/1%20Suspensionpres>

[mercedes-benz] http://techcenter.mercedes-benz.com/en/magic_body_control/detail.html; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015

[Mitra] A. Mitra, N. Benerjee, H- A. Khalane, M. A. Sonawane, D. R. Joshi, G. R. Bagul, “Simulation and Analysis of Full Car Model for various Road profile on a analytically validated MATLAB/SIMULINK model”

[performancecarstats] <http://performancecarstats.co.uk/performance-stats/audi/audi-tt-rs-2009/>; ultima vez consultado a 19 de Março de 2015

[Ping, Hseng] Chia Ping Cheng, Tzuu-Hseng S, Li, “EP-Based Fuzzy Control Design for an Active Suspension System with Full-Car Model”, *IEEE*

[Rashid] Muhammad Mahbubur Rashid, Mohamed Azlan Hussain, “Fuzzy Logic Controller for Mechatronics”, 2012

[shock absorber] http://en.wikipedia.org/wiki/Shock_absorber; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015

[Sisca] Isabel S. Jesus, “Controlo Lógico Difuso”, Outubro 2014

[STŘÍBRSKÝ] Antonín Stříbrský, Kateřina Hyniová, Jaroslav Honců, Aleš Kruczek, “Using fuzzy logic to control active suspension system of one-half-car model”, 2007

[torsion] <http://www.initialdave.com/cars/tech/suspensionbasics04.htm>; ultima vez consultado a 19 de Março de 2015

[tradeindia] <http://mmauto.tradeindia.com/car-maruti-800-rear-shock-absorber-50892.html>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015

[ultimatesuspension] http://www.ultimatesuspension.com.au/products_leafsprings.php; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015

[Vaughan] Joshua E. Vaughan, “Active and Semi-Active Control to counter Vehicle Payload Variation”, 2004

- [vwvortex] <http://s540.photobucket.com/user/DedRokGallery/media/d8ccb3b3.jpg.html>; ultima vez consultado a 18 de Fevereiro de 2015
- [Zadeh] Lofti A. Zadeh, “Fuzzy Logic”, Abril 1988